

15 - я Международная
научно-
техническая
конференция

ФИЗИЧЕСКИЕ И КОМПЬЮ-
ТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

2 – 3 декабря
2009 г

г. Харьков

Харьковская научно-производственная корпорация "ФЭД"
Харьковский национальный экономический университет
Одесский национальный политехнический университет
Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
Ассоциация технологов-машиностроителей Украины
Институт сверхтвердых материалов НАН Украины
Институт проблем машиностроения НАН Украины
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»
Харьковский национальный технический университет радиозлектроники
Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет
Харьковская государственная академия железнодорожного транспорта
Донецкий национальный технический университет
Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь
Сумской государственный университет
Национальная Металлургическая Академия Украины
Севастопольский национальный технический университет
Восточнoукраинский национальный университет им. В. Даля
Луцкий государственный технический университет
Одесское отделение Инженерной Академии Украины
Московский государственный открытый университет
Тульский государственный университет
Курский государственный технический университет
Ульяновский государственный технический университет
Саратовский государственный технический университет
Пермский государственный технический университет
ГП "Завод им. Малышева"
АО "Мотор - Січ"
Харьковское Государственное Авиационное производственное предприятие
ОАО ХМЗ "Свет шахтера"
ОАО Завод "Потенциал"
ЗАО Завод "Южкабель"
НТК "Эльбор-4", г. Харьков
Высшая техническая школа, Цвикау, Германия
Международная академия по развитию технологий, Кельн, Германия
Компания "Foxenergy", Верона, Италия
Жешувский технологический университет, Польша
Кафедра UNESCO "Интеллектуальное моделирование и адаптация нетрадиционных технологий к проблемам перспективного обучения и общественного прогресса"

ТРУДЫ 15-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО- ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

"ФИЗИЧЕСКИЕ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

**INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND
TECHNICAL CONFERENCE**

Харьков 2009

УДК 62-65: 621.382.82

Физические и компьютерные технологии.

Труды 15-й Международной научно-технической конференции, 2-3 декабря 2009г. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2009. – 523 с.

Представлены труды, в которых рассмотрены проблемы технологии машиностроения и обработки материалов; прогрессивные технологии, оборудование, инструменты и технологические системы; проблемы динамики и прочности машин, математики, механики, электрофизики и электроэнергетики, экономики и организации производства; проблемы создания и применения компьютерных технологий.

Для специалистов в области машиностроения, научно-технических работников и студентов.

КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ ПО ПРОВЕДЕНИЮ КОНФЕРЕНЦИИ:

Сопредседатели:

Якимов А.В., д.т.н.	(Одесса)	Крюк А.Г., к.т.н.	(Харьков)
Новиков Ф.В., д.т.н.	(Харьков)	Ларшин В.П., д.т.н.	(Одесса)
Фадеев В.А., д.т.н.	(Харьков)	Малыхин В.В., к.т.н.	(Курск)
<u>Члены совета:</u>		Морачковский О.К., д.т.н.	(Харьков)
Борисевич В.К., д.т.н.	(Харьков)	Новиков Г.В., к.т.н.	(Харьков)
Воробьев Ю.С., д.т.н.	(Харьков)	Проволоцкий А.Е., д.т.н.	(Днепропетровск)
Гринева В.Н., д.э.н.	(Харьков)	Петраков Ю.В., д.т.н.	(Киев)
Дитиненко С.А., к.т.н.	(Харьков)	Савченко Н.Ф., к.т.н.	(Харьков)
Клименко С.А., д.т.н.	(Киев)	Шкурупий В.Г., к.т.н.	(Харьков)
Ковальчук А.Н., к.т.н.	(Харьков)	Ямников А.С., д.т.н.	(Тула)
Коломиец В.В., д.т.н.	(Харьков)		

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ:

Андилахай А.А., к.т.н.	(Мариуполь)	Назаров Ю.Ф., д.т.н.	(Москва)
Гапонов В.С., д.т.н.	(Харьков)	Новоселов Ю.К., д.т.н.	(Севастополь)
Золотарев В.М., к.т.н.	(Харьков)	Новиков С.Г., к.т.н.	(Курск)
Ерошин С.С., д.т.н.	(Луганск)	Оргиян А.А., д.т.н.	(Одесса)
Иванов Е.И., к.т.н.	(Мариуполь)	Осипов В.А., к.т.н.	(Сумы)
Карпушенко В.П., к.э.н.	(Харьков)	Пермяков А.А., д.т.н.	(Харьков)
Кленов О.С.	(Харьков)	Свищев В.И., д.т.н.	(Пермь)
Королев А.В., д.т.н.	(Саратов)	Сизый Ю.А., д.т.н.	(Харьков)
Лавинский В.И., д.т.н.	(Харьков)	Скобло Т.С., д.т.н.	(Харьков)
Лавриненко В.И., д.т.н.	(Киев)	Степанов М.С., д.т.н.	(Харьков)
Лебедев В.Г., д.т.н.	(Одесса)	Тернюк Н.Э., д.т.н.	(Харьков)
Линчевский П.А., д.т.н.	(Одесса)	Шепелев А.А., д.т.н.	(Киев)
Макаров В.Ф., д.т.н.	(Пермь)	Усов А.В., д.т.н.	(Одесса)
Марчук В.И., д.т.н.	(Луцк)	Худобин Л.В., д.т.н.	(Ульяновск)
Матюха П.Г., д.т.н.	(Донецк)		

Труды воспроизводятся непосредственно с авторских оригиналов.

1. НАУЧНЫЕ КОНЦЕПЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ, МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ, НАНОТЕХНОЛОГИЙ

УДК 624.923

РАЗРАБОТКА ПРЕДПОСЫЛОК СТРАТЕГИИ НАУЧНОЙ КОММУНИКАЦИИ

Мазоренко Д.И., академик, **Скобло Ю.С.**, канд. техн. наук,
Тищенко Л.Н., докт. техн. наук, **Скобло Н.Ю.**, магистр
(г. Харьков, Украина)

Influence of different factors, their co-operations on creation of communications, providing the receipt of necessary knowledges are considered. Structures and maintenance of aims within the framework of strategy of communication are certain.

Введение. Суть свойств развивающегося общества включает в себя, прежде всего, показатели развития его научного потенциала, одним из компонентов которого является постоянная необходимость совершенствования коммуникаций как обязательного элемента в любой рассматриваемой поисковой среде. В этом случае понимание сути коммуникаций реализуется в рамках пункта «3)» термина «Коммуникация», содержание которого приведено ниже. Развития коммуникаций создаёт соответствующую суть комплексности в рамках определённого научного направления. Основой его является теория коммуникаций. Направленность любой коммуникации напрямую связано с её стратегической составляющей, которая фактически реализует базовые знания.

Актуальность. Таким образом, можно сформулировать направления нашего исследования, которые заключаются в том, что теория ещё сама по себе не может реализовать свои основы в конкретных случаях поисковой деятельности. Для этого необходимо постоянно создавать определённые механизмы, способные её реализовать для каждого конкретного случая коммуникаций. То есть, каждый раз необходимо создавать соответствующий инструментарий реализации коммуникаций, базирующийся на особых сочетания общего и частных подходов. Всё вместе это и составляет соответствующую организацию коммуникативного процесса (его предпосылок) в рамках определённо сформированной стратегии. Фактически здесь и сама стратегия является элементом предпосылки формирования коммуникаций, которая постоянно продуцирует (использует) в своём составе и другие необходимые условия.

Целью работы является рассмотрение в связи с высказанной проблемой, сущности использования теории. Сама теория коммуникаций не может самостоятельно обеспечивать решения проблемы и поэтому необходимо дополнительного привлечения к рассмотрению целого комплекса других теорий (в первую очередь теории той области знаний, в какой реализуются коммуникация). Выше перечисленные направления и создают предпосылки обеспечения такой возможности.

Основные исследования. Рассмотрим вопросы теории. Возможность осуществления на соответствующем научном уровне коммуникаций базируется на целой системе теорий (их комплексе), которые на уровне совместного функ-

ционирования является закономерным базовым «элементом» запланированных реализаций. Этот «элемент» и формирует те предпосылки, которые и обеспечивают заданную реализацию. В этом случае «элемент» работает как одно целое и образует соответствующую сверх систему. Отсюда следует простой вывод, что формирование коммуникаций обычно сопровождается постоянными, соответствующими сопряжениями используемых теорий. И, с этого момента акцент выше высказанной проблемы естественно переходит в ракурс указанных построений. Становится ясным, что востребованным становится организация соответствующих знаний для осуществления определяющих коммуникаций. Такая организация естественно также базируется на теории стратегического сопряжения. Стратегическим она является из-за своей соподчинённости структуре целей и задач задуманной коммуникации. Фактически необходимо создать несколько уровней организации поиска и остановиться именно на том пункте, который создаст необходимую, ясную предпосылку начала рассмотрения вопроса реализации коммуникаций и именно через подход, осуществляемый в рамках основной идеи работы, в виде теории стратегической организации (тут именно в реализации) коммуникаций.

Теория коммуникаций. Суть этой теории является, с одной стороны, составной частью общей теории. В данном случае вопрос содержания общей теории в данной работе не рассматривается широко, а представлен только на уровне общего подхода сформированного в виде рамочных представлений в связи с тем, что это, по большому счёту, является вопросом прерогативой философии, логики и так далее и не входит в настоящий круг поставленных целей и задач. С другой стороны, теория коммуникаций является также комплексной теорией, и имеет в своём составе совокупность обеспечивающих теорий различных друг друга по своей природе и способами использования. Организация такого использования выше заявленной совокупности представляется как соответствующая стратегия формирования необходимой базы составляющих (теорий) в процессе формирования коммуникаций.

Первичные (априорные) элементы рассмотрения. К первичным элементам относятся в первую очередь содержание круга терминов и определений, которые обычно опубликованы в энциклопедических словарях, справочниках и специальной литературе. В этом разделе мы приведём только два термина «Коммуникация» и «Стратегия». Так первый - создаёт на начальном этапе рассмотрения суть области о которой идёт речь, а второй - отражает основное содержание (направленность) работы. Остальные термины будут приводиться и обсуждаться по мере необходимости их рассмотрения. Рассмотрим содержание двух указанных терминов и определений, а также других, близких к ним словосочетаний.

Коммуникация – 1) процесс передачи информации, её кодирование, дешифровка, способность восприятия и понимания; 2) обмен информацией любого вида между различными системами связи; 3) акт общения между людьми посредством знаковых систем, смысловой аспект социального взаимодействия. Коммуникативные действия - действия, ориентированные на смысловое их восприятие другими людьми.

Коммуникационные барьеры – затруднения в общении, вызванные соци-

альной дистанцией, разными ориентациями и установками, общающихся лиц.

Коммуникационная дистанция – деформированное восприятие информации под влиянием интересов и интеллектуального потенциала адресата.

Коммуникация массовая – процесс систематического распространения информации на большие рассредоточенные аудитории с помощью технических средств.

Коммуникация подсознательная – 1) импульсивная, рационально не контролируемая передача информации; 2) передача информации, рассчитанная на подсознательное её восприятие (внушающий характер информации).

Стратегия – (от греч. Strategio – веду войско) общий план действий для достижения необходимого результата. В отличие от тактики, решает частные, промежуточные задачи. Стратегия решения нестандартных задач связана с применением эвристических приемов (эвристик).

Общая схема вопросов, которые рассматриваются в данной работе. Такая схема приведена на рис. 1.

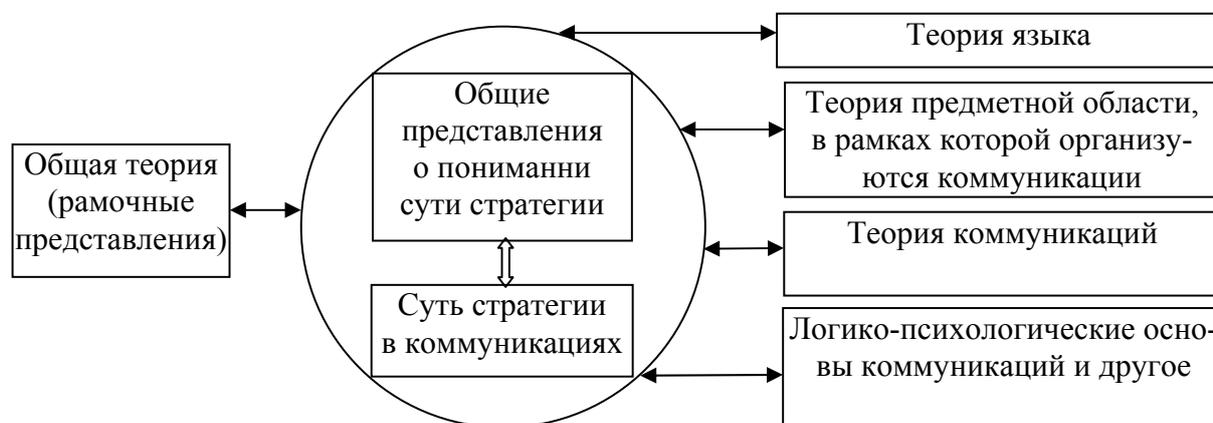


Рис. 1. Общий состав вопросов и состав основных вопросов, рассматриваемых в работе (кроме «Теории языка»).

Основная особенность работы. Такой особенностью есть представление знаний в виде логико-информационных моделей, которые обеспечивают большую наглядность и способствуют формированию более глубоких представлений о рассматриваемых областях знаний, особенно когда это делается на общем уровне их рассмотрения. В настоящее время в научной литературе такой подход особенно часто используется при изложении достаточно сложных вопросов. Одним из явных преимуществ представления какого-либо описания в виде логико-информационных моделей есть то, что позволяет наглядно наблюдать все взаимосвязи и последовательности выделенных компонентов. При этом достигается их полная наглядность.

Основная идея работы. Избранная идея работы основывается на том факте, что коммуникация является результатом сложения многих научных направлений, которые реализуются в человеке в процессе соответствующего вида его деятельности. Такой подход сразу формирует очередное понимание, что сама коммуникация есть процесс реализаций, результат которого складывается путём поиска соответственных соотношений составляющих направлений, в междисциплинарной области знаний. Фактически при формировании всегда

новой специальной междисциплинарной области возникает соответственный естественный вопрос о её построении. В рамках формирования конкретной области коммуникаций это всегда новая область построений где могут быть задействованы как абсолютно новые направления, так и модернизированные – старые и их составляющие. Таким образом, как первичный шаг в построении коммуникаций каждый раз необходимо устанавливать вид человеческой деятельности, о котором идёт речь в данной запланированной коммуникации. Построить соответствующий перечень теорий-составляющих, что входят в область сложной междисциплинарной направленности. При этом теории-составляющие должны быть ориентированы относительно тематической направленности сферы избранной коммуникации.

Методология проведения работы. Настоящая работа построена на рассмотрении и использовании системного метода исследования относительно построения стратегии коммуникаций. В качестве системных элементов используются обычные понятия - сверх система, составляющие системы, представления «обратной связи», сущность связей в системах и главное и на этой основе осуществлён структурный анализ конкретных составляющих.

Объектом исследования есть совокупность предпосылок построения стратегии коммуникаций. Поэтому для систематизации таких предпосылок было предусмотрено их представление и соответствующие определения в рамках различных уровней. Сама стратегия представлена в рамках уровней теории; соответствующих образований в виде моделей различного характера: логико-информационных, «информационных пар» и другого, в которых и осуществляется представления.

Основная суть коммуникаций. Рассмотрение коммуникаций возможно достаточно глубоко только с позиции формирования представлений об их сути и относительно того, что они включают для каждого индивидуума. Таким перво-степенным элементом есть не что иное как понимание их роли в общем функционировании индивидуума. Общее понимание функционирования индивидуума заключается в том, что каждый из них в процессе своего существования и развития строит определенные «психологические среды» обитания (деятельности, проживания, мыследеятельности и так далее), в которых они функционирует за счёт формирования определённых своих функций. В первую очередь, в систему таких функций собственной реализации входят: функции психологическая, социальная, деятельности (или её антипод – бездеятельности – в зависимости от обобщённой функции, сформированной в рамках соотношения «миссия – цель») и так далее. В конечном итоге эти все основополагающие функции человеческого существования в целом и отображают формирование и развитие коммуникативной функции человека, развивая (совершенствуя) при этом, соответствующие уровни направленности и содержания коммуникаций. Совокупность вышеизложенных функций и формируют отображение общего состояния индивидуума (рис. 2. - пункт «А.»). В процессе своего развития индивидуум постоянно стремиться добиться соответствующего уровня (при этом происходит постоянное сравнение собственного развития) относительно среды своего функционирования и, в первую очередь, оценивается наличие и глубина сфор-

мированной целостности, в том числе, и на функциональном уровне (в рамках выше указанных функций). Такие устремления формируют в нём естественный переход от нормального состояния к нормальному развитию (см рис. 2. - пункт «В.»). На очередном этапе своего развития индивидуум добивается создания состояния, характеризующегося (как минимум) отсутствием дисфункций в своём действующем потенциале (см. рис. 2. - пункт «С.») при этом может возникнуть состояние (см. рис. 2. - пункт «D.»), характеризующееся застоём или отсутствием возможности совершенствования, или же вообще отсутствием поступления новых знаний. Суть дисфункции составляют «разрывы» отображений при функционировании «информационной пары» в форме: «создание целостности - формирование новых знаний». Данное состояние может привести к естественной потере возможности дальнейшего развития индивидуума. Эти варианты развития возможных направлений учтены в рамках пунктов «E.» и «F.». С другой стороны следует рассмотреть, что же происходит с данными в процессе формирования коммуникаций. Начало формирования создаёт соответствующую предпосылку в виде построения строго организованной «среды коммуникаций». Основу для её возникновения, в виде соответствующих предпосылок, создают результаты причинно - следственного анализа, которые становятся основанием для вывода о необходимости их проведения (коммуникаций). Вместе с содержанием доказательств, полученных на основе использования результатов анализа, сложившийся элемент переходит в мотивацию реализацию коммуникаций. Как результат всего выше рассмотренного у индивидуума формируется новая среда психологических отображений, которая определяет постоянную «среду заинтересованности». Дальнейшее развитие коммуникаций зависит от полноты и глубины целостности обменов между этими двумя средами. То есть, как кажется на первый взгляд необходимо, постоянно строить две среды и осуществлять соответствующий обмен между ними. Однако, этот информационный обмен воспроизводит воссоздание новых и углубление старых связей, поиска знаний и так далее в рамках уже, как стало понятно, трёх сред: «среды коммуникаций», «среды заинтересованности» и - наконец «среды обмена». Суть всех «сред» формирует реализация постоянного их совершенствования на основе возникновения взаимных обращений одной среды к другой, что происходит на постоянной основе. Таким образом, формируется замкнутый круг функционирования. На сформированных этапах установившегося своего функционирования он фактически отображение формирование системы, которая только и занимается вопросами углубления своего целостного состояния. Такая система, её «работа», формирует возможность постоянного углубления своей целостности или иначе говоря - система постоянно стремиться к укреплению и углублению своих собственных позиций для создания устойчивого функционирования.

Для индивидуума естественно наступает период пользования столь развитой системы, что создаёт соответствующие предпосылки развития и углубления коммуникаций в рамках её «первичной среды» (рис. 3.). Эта «первичная среда коммуникаций» является также и одним из стратегических совокупных элементов.

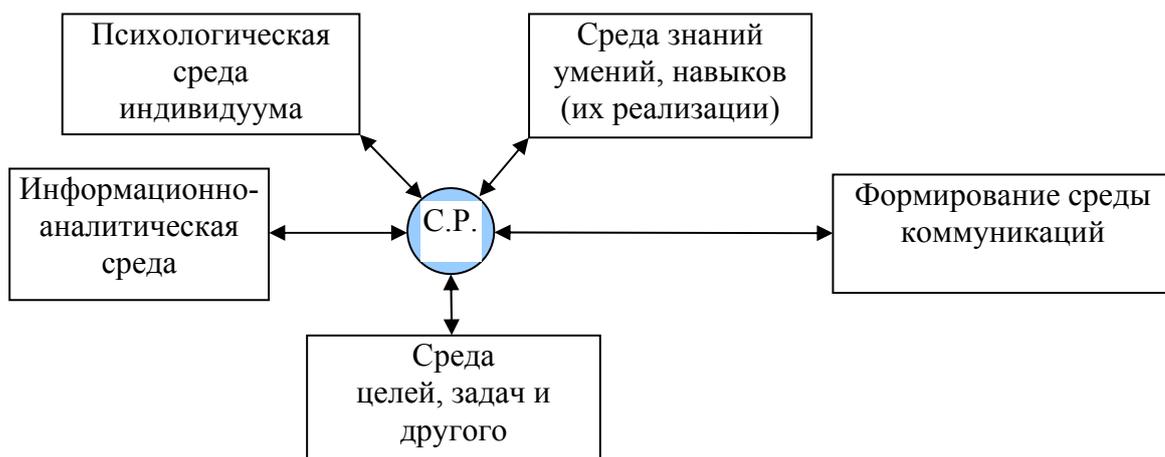


Рис. 3. Совокупная первичная среда проведения коммуникаций, направленная на создание будущего результата (С.Р, - среда результата).

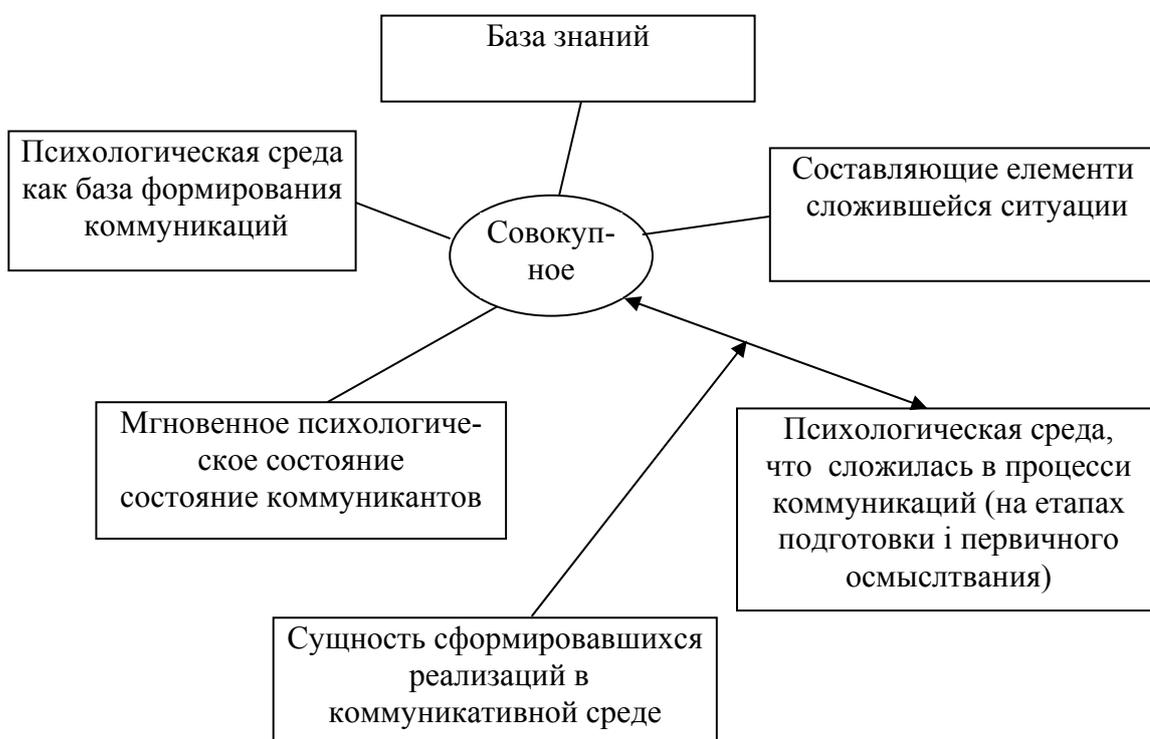


Рис. 4. Модель совокупной «среды», учитывающая различные психологические состояния индивидуума.

По своей сути «третья среда» - представляет собой формирование запросов к двум другим «средам» и занимается также вопросами их реализации. То есть, это «среда» фактически формирует организацию совокупного функционирования и потоков управляющей информации что соответствует процессу «глобализации». На этом этапе создаётся и реализуется управление совокупной средой, состоящей из трёх частей, но уже в рамках одной коммуникаций. То есть со временем наблюдаем поворот сформированной общей совокупности в рамках развития общей направленности в сторону достижения уровня стратегической основы в формировании сути коммуникаций.

Относительно индивидуума, то у него в процессе подготовки и в начале реализации коммуникаций наблюдается также формирование совокупной «первичной среды», обладающей одним из основных свойств – а именно, она харак-

теризуется определённой направленностью и ориентирована на ожидаемый результат, проявляющийся в виде «среды результата». Впоследствии эта «среда» претерпевает изменения и имеет вид предлагаемый рис. 4.



Рис.5. Примерное (общее) содержание и структура теории коммуникаций.

Основной сутью этой схемы является подчёркивание роль соотношения совокупного продукта, в том числе и точки зрения индивидуума, его сформированного понимания относительно как всех компонентов, так и их целого с изменяющимся состоянием коммуникаторов в рамках отображения психологического функционирования. То есть, в этом случае сформированное целое имеет обязательное специфическое соотношение с мгновенным состоянием человека. И этот фактор не менее значим в формировании коммуникаций, чем все остальные составляющие, которые сформированы индивидуумом на протяжении всего относительно длительного времени при «построении» ранее отмеченной «первичной среды». Модель, построенная по этим принципам, приведена на рис.4. Он рассматривает соотношение с мгновенным состоянием коммуникаторов в рамках аналогий с работой, в которой оценивается влияние таких состояний на процесс в области принятия и реализации решений.

Подводя итоги этого анализа следует отметить, что процесс построения коммуникаций зависит от закономерных процессов развития психологических

состояний индивидуума и отображается в виде построения соответствующих *сред* (пространств).

В настоящее время в ряде наук сложилось представление о необходимости рассмотрения их содержания как соответствующее формирование «среды» [2]. Для рассмотрения стратегии коммуникаций следует подходить к этому вопросу на ещё более глубокой основе, так как это связано с тем, что человеческий фактор имеет определенные формы и «вмешивается» во все составляющие процесса коммуникаций начиная от их проектирования и кончая вопросами использования их результата.

Коммуникации следует рассматривать как процесс, который складывается в рамках закономерностей, связанных с его составляющими, что отображают соответственные этапы развития их жизненного цикла. В общем случае жизненный цикл характеризуется следующими основными этапами: формированием исходных элементов коммуникаций, их проектированием, реализацией коммуникаций, обобщением процесса коммуникаций и использованием полученных результатов.

Газовым элементом для построения любой общей теории, является - частная. Так как её содержание или отдельные элементы обеспечивают возможность «проникновения» в любую «среду» другой частной теории. Таким образом, в этом случае выстраивается естественное предположение, что механизм «проникновения» в любую другую частную теорию может реализовываться путём закономерного использования общей теории (рис. 6).

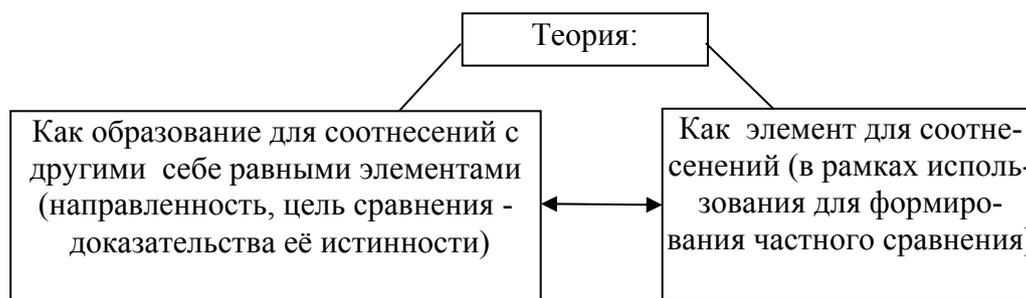


Рис. 6. Теория как элемент, обеспечивающий сравнения и как обеспечиваемый элемент соотнесения.

Становиться понятным естественное стремление всех исследований внести свой вклад в развитие общей теории на основе использования разрабатываемой частной теории. То есть, в таких условиях (вход в общую теорию через частную), создаётся системная реализация обратной связи обычной системы и наблюдаем соотнесение частной теории со сверх системой, в роли которой выступает общая теория – конкретно за счёт реализации одного из основных составляющих элементов в общей структуре системного метода, т.е. именно реализация «обратной связи». Фактически на данном этапе «начала» построения частной теории, которой в данном случае является теория коммуникаций, используется в качестве основного инструмента – общая теория. Одна из возможностей формирования теории представлено нами на рис.7.

Любая теория основывается на определённых правилах. То есть наличие правил её построения является обязательным компонентом-правилом. Представ-

ленное создаёт платформу для проведения необходимых поисковых соотношений в рамках «общей», частной теорий, а также правил их построения. Все указанные элементы и являются предпосылками для построения как стратегии коммуникаций, так и всего процесса.

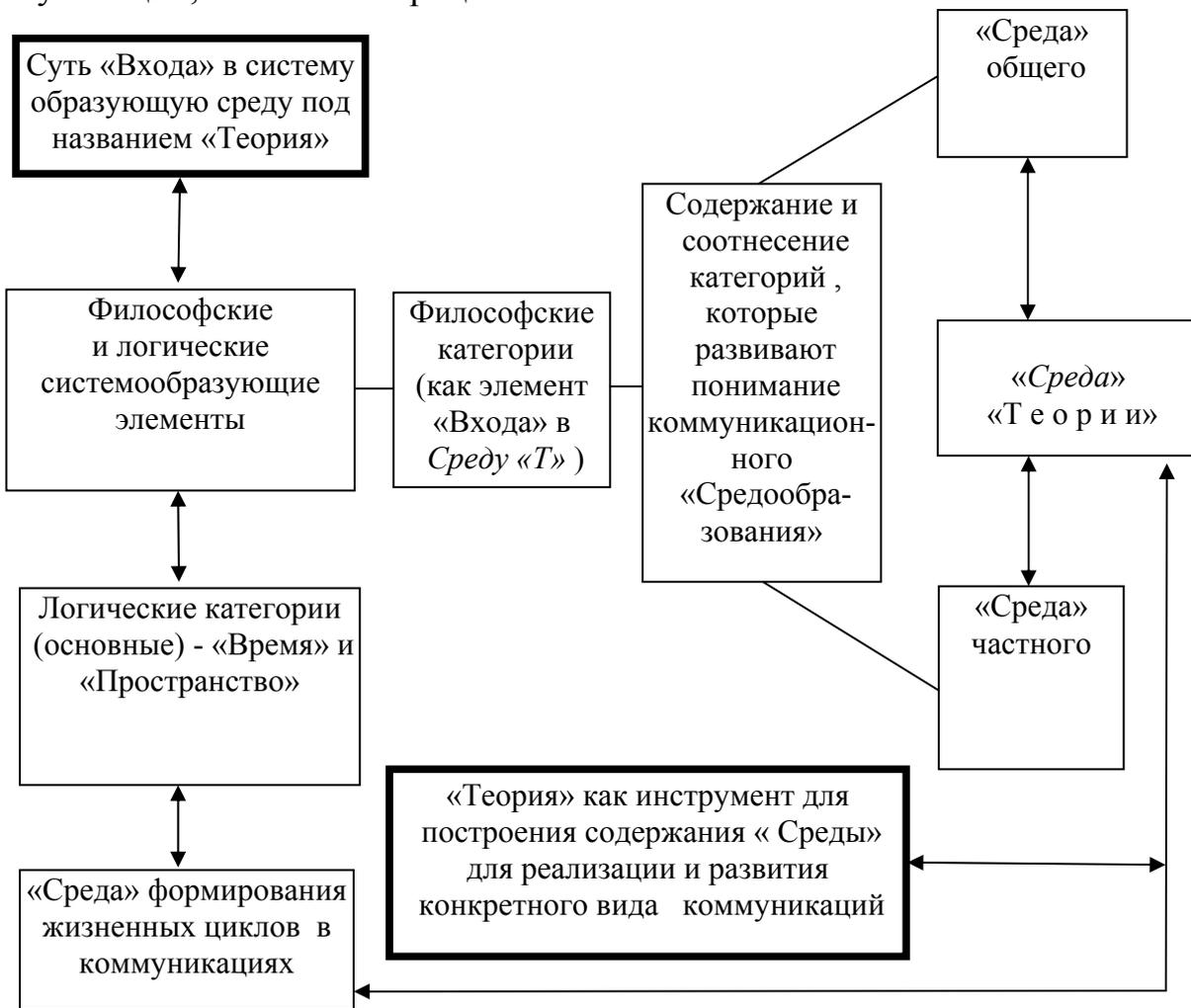


Рис.7. Системообразующие элементы и представления о формировании содержания теории («Т» - Теория).

Основной сутью частной теории коммуникаций (см. рис. 5) есть совокупность её *базы* и организация непосредственно коммуникации, которая представляет собой две составляющие, их можно описать рамками содержания тождественно сложившейся, так называемой, «информационной пары» в составе направления предпринятого рассмотрения: «развитие индивидуума» - «его ассимиляция в обществе».

В основу составляющих базы коммуникации входят: материнский язык и знания. В этом случае знания выступают в роли объекта, который претерпевает постоянное развития, а язык есть соответствующим инструментом их представления. Любые знания должны быть представлены в рамках языка - знаковой системы. Как показано рис. 5 сформировали содержание информационной пары в несколько ином виде относительно - «Язык - знания» к виду пары - «объект» - «инструмент его представления». Функционирование этой пары обеспечивает предпосылку любой коммуникации и есть краеугольным камнем, который способствует реализации процесса.

В основу составляющей базы коммуникации входят: материнский язык и знания. Знания выступают в роли объекта, который претерпевает постоянное развитие, а язык - соответствующий инструмент их представления. Любые знания должны быть представлены в рамках языка - знаковой системы, что в принципе является единственной возможностью их представлять. То есть, тут (см. рис. 5) сформировали содержание информационной пары рассмотрения в несколько ином виде. Перешли от содержания её рассмотрения относительно - «Язык - знания» к виду пары - «объект» - «инструмент его представления», который более пригодный для последующего рассмотрения, т.е. анализа на данном этапе содержания коммуникаций. Функционирование этой пары обеспечивает предпосылку любой коммуникации и есть краеугольным очередную предпосылкой – правилом относительно стратегии. Это реализации процесса проведения коммуникаций.

Кроме того, отдельной составляющей есть и организация коммуникаций, которая с одной стороны отображает её стратегию а, с другой - способность индивидуума ассимилироваться в обществе. Естественно, для поддержания функционирования этой составляющей необходимо иметь постоянное организованное соотношение между развитием стратегии коммуникаций и реалиями общества. В целом, кардинальные изменения в обществе весьма редки, его реалии остаются более или менее стабильными. Стратегия же развития коммуникаций всегда остаётся подверженной изменениям по причине углубления запросов, связанных с развитием жизнедеятельности человека, что отображает составляющая - «Знания». Поэтому очередной информационной парой принятой к рассмотрению можно признать пару «Стратегия коммуникаций»- «Знания».

Если исходить из того, что показателями отображения развития человека есть соответственно уровни развития его языка и знания, то естественно первая пара свидетельствует о том, что эти две её составляющие являются и основой в понимании содержания развития предпринимаемой коммуникации. Вообще суть развития человека представляет собой комплекс этого парного взаимодействия, так как только знания продвигают развитие человека и его деятельность. Они фиксируются в виде высказываний, обсуждений и представлений.

Возвращаясь к построению частной теории коммуникации, (см. рис. 5) рассмотрим структуру одного из самых значащих её компонентов, а именно «Знаний» (рис. 8). В отношении указанной модели видно, что основная суть развития знаний осуществляется связь их с различными элементами соответствующей базы, построенной в рамках реализации, связей, которые формируются в процессе их возникновения и использования. К ним также относятся и идеи-направления в развитии знаний (см. рис. 7), осуществляемые в рамках построения теории.

Также следует отметить наличие следующей по значимости информационной пары: «знания – стратегия коммуникаций». Хотя они принадлежат разным структурным составляющим частной теории коммуникаций, однако по составу решаемых проблем формируют единые образования, обеспечивающие именно организацию стратегии коммуникаций.

Совокупность знаний, приобретаемых в рамках организации и реализации стратегии коммуникаций, фактически определяет успех и качество прове-

дения поиска. Процесс стратегии коммуникаций является довольно ёмким вопросом и постоянно нуждается в соответствующей поддержке в виде части специальных знаний. Вообще суть построения стратегии коммуникации является отдельным серьёзным вопросом, который в общем понимании - входит в область методологии и представляется как стратегический анализ.

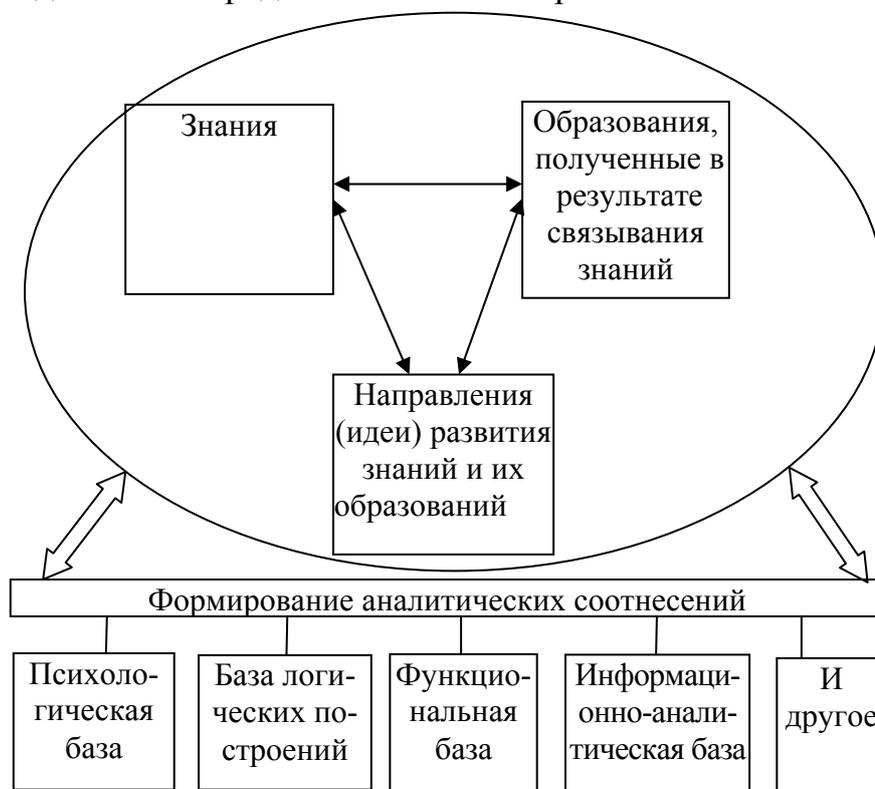


Рис.8. Формирование знаний и база их возникновения и развития.

Таким образом, в рамках рассматриваемого раздела показано, что содержание стратегии коммуникаций с первых шагов их проведения должно базироваться на основе общей и частных теорий, которые в свою очередь строятся на основе соответствующих правил. Такими правилами в первую очередь, являются способ входа в теорию, её обоснование при конкретной внутренней структуре.

Формирование коммуникаций – как результат реализаций в междисциплинарной области. Элементы теория междисциплинарной области. Сфера коммуникаций представляет собой симбиоз, сформированный на базе многих областей научных знаний. Поэтому на уровне общего рассмотрения коммуникации её можно представлять как междисциплинарную область знаний, связанную единой целью – изучением необходимого информационного обмена, в результате которого создаются соответствующие предпосылки для однозначного понимания спорных вопросов или разночтений. Суть функционирования межпредметной области (рис 9) - это построение перехода из одной составляющей области в другую по специальным планам которые являются подчинёнными генеральной линии стратегии. Это позволяет получить единое понимание поставленных задач. Это возможно только в условиях разработки стратегии такого функционирования в междисциплинарной области, то есть одновременно и в

области коммуникаций. По своей сути формируемая стратегия является продуктом, так как представляет собой совокупность главной и частных стратегий представленных на рис. 10. В рамках такой стратегий и создаётся организационная система, позволяющая дать целостное образование в виде коммуникации и получить ожидаемый результат.

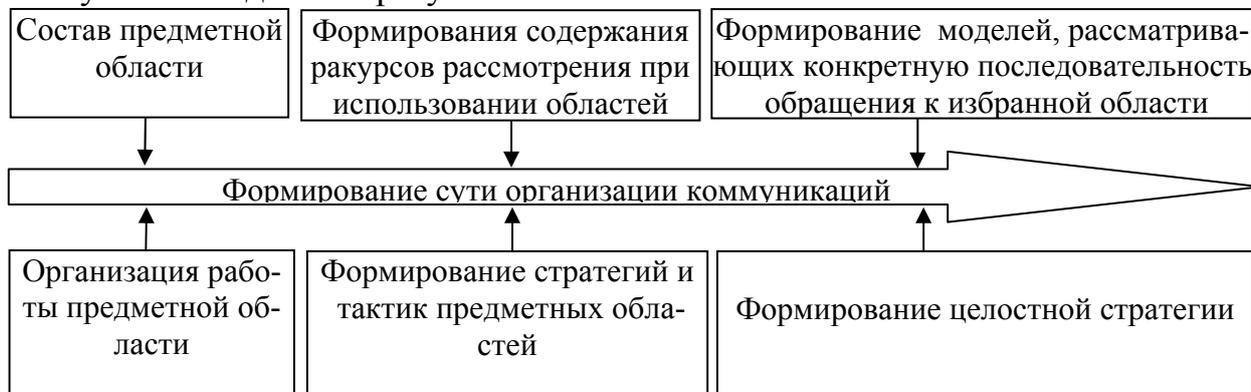


Рис. 9. Формирование организационных предпосылок для реализации коммуникаций.



Рис.10. Формирование совокупного элемента (стратегии) для реализации организации коммуникаций.

Закономерностью стратегического подхода является формирование достаточно ясного представления о конечном результате, который и является тем целостным продуктом, что формирует последующие поиски в базовых элементах известных образований. К таким основным образованиям относятся, в первую очередь, - общая теория, междисциплинарная область и предметная область конкретного вопроса. Структурированное целое «всегда ищет» себе подобных в рамках выше указанных образований путём соответствующей переориентации. Такая переориентация способна в виде запросного элемента составить соответствующие в позициях указанные базовые элементы, а также параллельно установить тех представителей каждого образования, которые могут образовать связи. Таким образом, создаётся первичная база взаимодействия, но уже в рамках всех используемых образований, естественно ориентированных на целостное представление конечного результата, который продолжает под-

тверждать укреплять свою целостную природу.

Постоянное расширение сред взаимодействий - создаёт предпосылку для реализации постоянного приближения (их слияния) в единую среду, однако на практике возможность такой реализации отсутствует. Построение взаимодействий базируется на элементах и не может полностью охватить всю среду, хотя желательно стремиться её построить для лучшего понимания отражения функционирования [3].

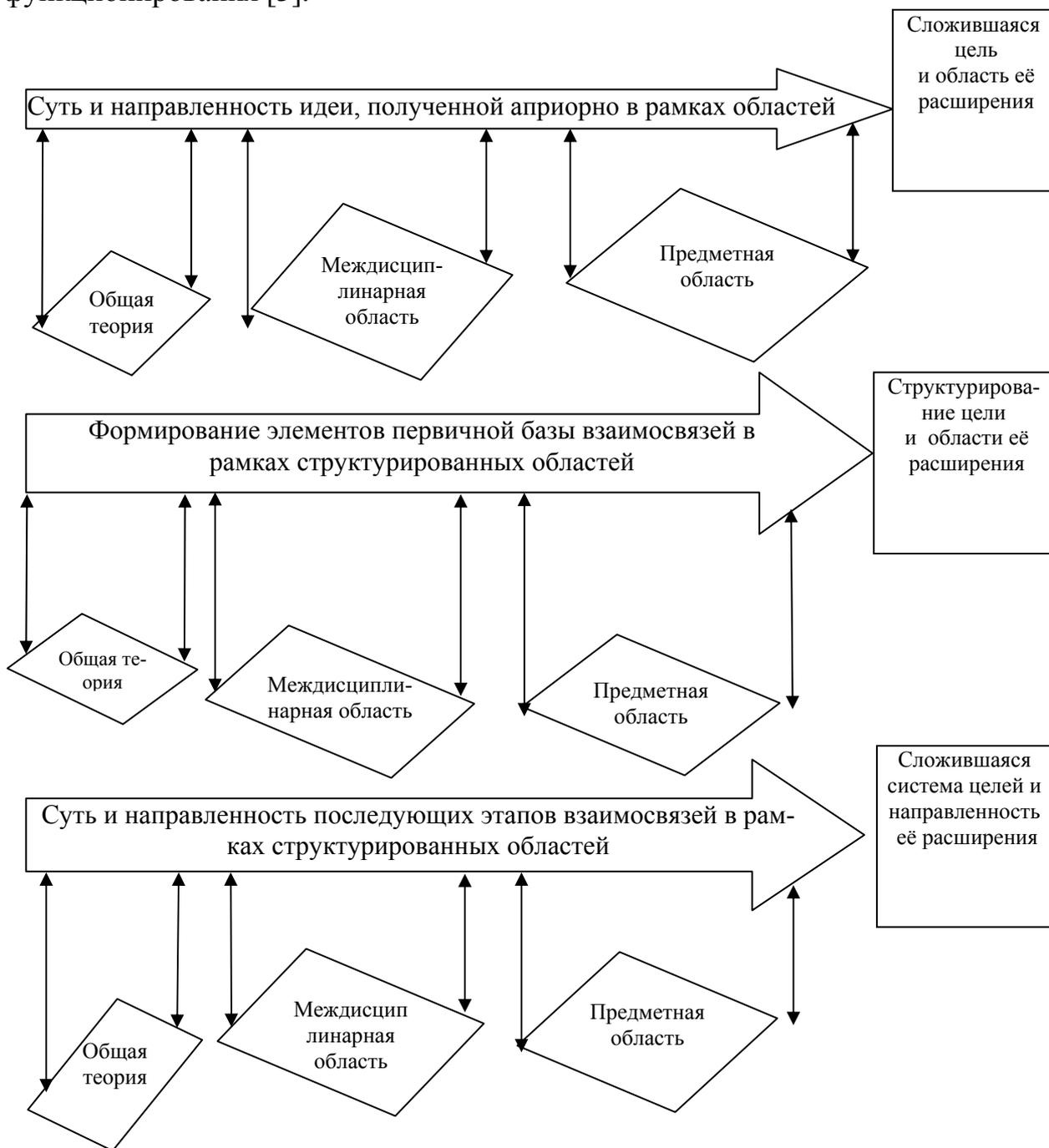


Рис. 11. Модель построения функционирования стратегической цели (область, предмет, теория).

Значительный интерес представляет суть формирования взаимодействий, что закладывается выделенным первичным элементом из любой области (рис. 11 и 12). Данный элемент формирует указанные взаимодействия за счёт ис-

пользования выявленных одинаковых (или близких) по смысловому содержанию запросов, что сформировано структурированием содержания среды целей. В рамках будущего прецедента последующих взаимодействий необходимо определить фактически запрос для среды целей и, таким образом сформировать необходимую структурированную область, способную оценить возможности последующих исследований (поиска). Как видно из выше изложенного каждый раз следует стремиться к «выделению сред», её последующему структурированию. Пример структурирования «среды» целей показано в табл. 1.

Таблица 1

Структура и содержание целей в рамках стратегии коммуникаций

№	Перечень целей и их составные части	Содержание целей	Смысл целей	Ожидаемый результат	Содержание ожидаемых результатов	Задачи, что соответствуют целям
1	2	3	4	5	6	7
1	Наивысшая цель коммуникаций	Упорядочения в сфере формирования коммуникаций	Преобразование всех действий, их способов, методов в единое целое в рамках понимания стратегических реализаций	Модель работы системы в рамках стратегических формирований	Формирование легко соотносимой специальной среды стратегии	Установление природы и содержания упорядочения по всем составным частям
2	Основные цели: а) формирование системы стратегического подхода и реализаций в коммуникации; б) обеспечение предпосылок работы системы стратегического характера; в) формирование условий для усовершенствования системы разработанной стратегии	Формирование и реализация содержания в научно-обоснованных требований к разработке стратегии коммуникаций	а) Установление составляющих, которые формируют содержание по принципам системного представления в виде её составляющих (подсистем); б) структуризация подсистем; в) установление смыслового содержания углубления связей, механизмов, взаимодействия систем как между собой, так и возможными другими внешними системами в рамках разработанной стратегии	Комплекс общих представлений о средствах поддержки в проведении коммуникаций	Представление моделей коммуникаций и элементов стратегии в рамках сложившихся	Формирование стандартных моделей реализации коммуникаций и избранной стратегии

Продолжение табл.1

1	2	3	4	5	6	7
3	<p>Основные методические цели:</p> <p>а) принципы и направления использования результатов коммуникаций;</p> <p>б) принципы разработки и использования стратегии для достижения запланированных результатов коммуникаций</p> <p>б) принципы последующих возможностей в углублении использования опыта проведения коммуникаций;</p> <p>в) принципы разработки и усовершенствования содержания системного и стратегического анализ в рамках построения и реализации коммуникаций</p>	<p>Получение инструмента подготовки и реализации стратегии коммуникаций</p>	<p>Углубление содержания «работы» стратегии коммуникаций и знаний в её возможностях:</p> <p>а) стратегия разработки в рамках этапов жизненных циклов коммуникаций;</p> <p>б) разработка логических последовательностей в подготовке, построении и изучении стратегии коммуникаций;</p> <p>в) разработка содержания и изучения предпосылок формирования коммуникаций – как методический приём</p>	<p>Возможность обособленного (осмысленного) построения и осуществления коммуникаций</p>	<p>Формирование состава методов и способов, обеспечивающих подготовку, организацию и проведение коммуникаций</p>	<p>Разработка методического обеспечения для разработки стратегии коммуникаций</p>
4	<p>Общие, системные цели:</p> <p>а) рассмотрение вопросов внешних связей системы;</p> <p>б) рассмотрение внутренних связей системы;</p> <p>в) информационное обеспечение работы системы и подсистем</p>	<p>Формирование содержания стратегии коммуникаций, с одной стороны, как системы, а с другой стороны – как подсистемы, – относительно коммуникаций</p>	<p>а) установление связей (соподчинение системы) стратегии с системой коммуникаций;</p> <p>б) установление механизмов влияния и взаимодействий между системой и системой;</p> <p>в) формирование банка данных, методов извлечения информации и её организации</p>	<p>Обеспечение адаптации рассматриваемой системы с другими системами, разработываемой стратегии с общей теорией</p>	<p>Переформирование отдельных организационных образований в соответствующую систему</p>	<p>Установление перечня и содержания задач стратегии</p>

1	2	3	4	5	6	7
5	Цели, что формируют возможность функционирования избранной стратегии	Определение содержания технологии работы стратегии	а) установление содержания предпосылок, что способствуют формированию работы стратегии; б) установление состава и содержания основных стадий реализации стратегии;	Установление свойств и признаков оптимально действующей стратегии	Определение состава и содержания обеспечения стратегии	Формирование содержания стратегии и коммуникаций на всех её этапах Жизненного цикла и другое

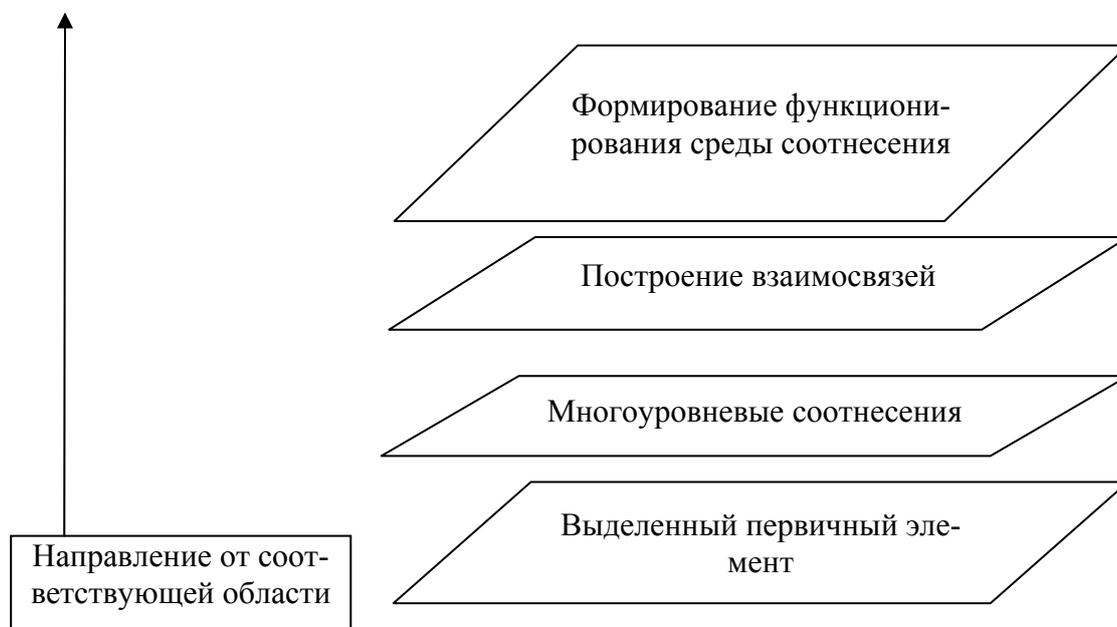


Рис. 12. Модель среды взаимодействия в рамках функционирования стратегической цели.

Выводы. Создание и реализация коммуникаций представляет собой сложный процесс. Формирование такого процесса создаёт ряд предпосылок его построения. К числу предпосылок необходимо отнести вопросы организации коммуникаций через которые решается эта проблема. Такой главной предпосылкой является стратегия коммуникаций. Предпосылки реализации стратегии и коммуникаций основаны на общих вопросах теории, её частных элементах и междисциплинарной области. В данной работе фактически предлагается использовать в качестве инструмента реальные взаимосвязи и принципы их осуществления. На основе построения стратегии коммуникаций создаётся реальная возможность достижения необходимых запланированных результатов.

Литература: 1. Фаули П. Человеческий фактор / [Ж. Кристиансен, Д. Мейстер, П. Фаули и др.] – М: Мир, 1991. – Т.2. Эргономика - комплексная научно-техническая дисциплина. – 599 с. 2. Günzel St. Suhrkamp taschenbuch Wissenschaft. Raum Wissenschaften. / St. Günzel. – Berkeley: Elsvier, 2009. – 183 p. 3. Иванов Е.А. Логика / Е.А. Иванов. – М: Волтерс Клувер, 2003. – 420 с.

УДК 621.923

МЕХАНИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕЖУЩЕГО ЗЕРНА С МАТЕРИАЛОМ ПРИ СТРУЙНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, **Андилахай А.А.**, канд. техн. наук
(г. Харьков, г. Мариуполь, Украина)

We justify the laws of mechanics of interaction of the cutting grain with the material in the abrasive blasting.

Струйно-абразивная обработка находит все более широкое применение в машиностроении [1, 2]. Однако вопросы механики процесса изучены недостаточно полно. Поэтому целью работы является обоснование закономерностей механики взаимодействия режущего зерна с материалом при струйно-абразивной обработке. Установим характер движения абразивного зерна массой m под действием возникающей в процессе съема обрабатываемого материала

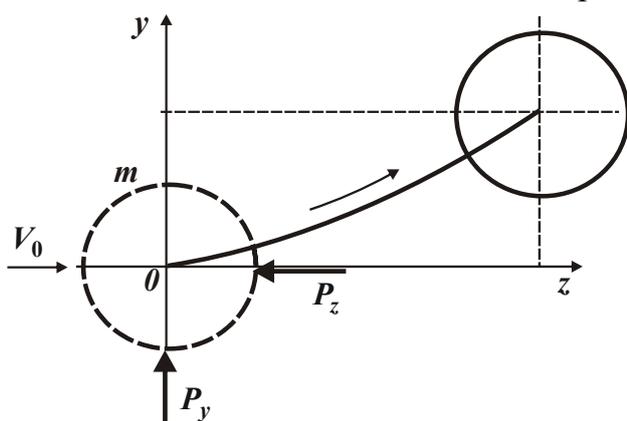


Рис. 1. Расчетная схема траектории движения абразивного зерна в обрабатываемом материале.

силы резания P [3]. Будем считать, что зерно движется с начальной скоростью V_0 в направлении оси oz , рис. 1. Тогда уравнения движения абразивного зерна во времени τ в направлениях осей oz и oy под действием тангенциальной P_z и радиальной P_y составляющих силы резания опишутся следующим образом:

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{z}(\tau) = -P_z; \\ m \cdot \ddot{y}(\tau) = P_y, \end{cases} \quad (1)$$

где $\ddot{z}(\tau)$ и $\ddot{y}(\tau)$ – соответственно

ускорения движения абразивного зерна в направлениях осей oz и oy , м/с^2 .

Решения дифференциальных уравнений (1) общеизвестны:

$$\begin{cases} z(\tau) = -\frac{P_z}{m} \cdot \frac{\tau^2}{2} + C_1 \cdot \tau + C_2; \\ y(\tau) = \frac{P_y}{m} \cdot \frac{\tau^2}{2} + C_3 \cdot \tau + C_4, \end{cases} \quad (2)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 – постоянные интегрирования, определяются из следующих начальных условий:

$$\begin{cases} z(\tau = 0) = 0; & y(\tau = 0) = 0; \\ \dot{z}(\tau = 0) = V_0, & \dot{y}(\tau = 0) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Подчиняя полученные решения (2) начальным условиям (3), имеем

$$\begin{cases} z(\tau) = -\frac{P_z}{m} \cdot \frac{\tau^2}{2} + V_0 \cdot \tau; \\ y(\tau) = \frac{P_y}{m} \cdot \frac{\tau^2}{2}. \end{cases} \quad (4)$$

Как видно, в направлении оси ou с течением времени τ абразивное зерно движется равноускоренно с ускорением P_y / m , а в направлении оси oz – равнозамедленно с ускорением $-P_z / m$. При выполнении условия $\dot{z}(\tau) = 0$ абразивное зерно остановится. Время τ и длина пути зерна в металле z до момента его остановки равны

$$\tau = \frac{m \cdot V_0}{P_z}; \quad z = \frac{m \cdot V_0^2}{2 \cdot P_z}. \quad (5)$$

Время τ и длина пути зерна в металле z тем больше, чем больше начальная скорость зерна V_0 и меньше ускорение его равнозамедленного движения P_z / m . Длина пути зерна в металле y до момента его остановки определится подстановкой зависимости (5) во второе уравнение системы (4):

$$y = \frac{m \cdot V_0^2}{2 \cdot P_z} \cdot \frac{1}{K_{uz}} = \frac{z}{K_{uz}}, \quad (6)$$

где $K_{uz} = P_z / P_y$.

При условии $K_{uz} < 1$ координата y абразивного зерна будет больше координаты z , а при $K_{uz} > 1$, наоборот. Следовательно, увеличивая коэффициент K_{uz} , можно уменьшить координату y и соответственно повысить эффективность процесса резания. Разрешая второе уравнение системы (4) относительно времени τ и подставляя полученное выражение в первое уравнение, установим в общем виде связь между координатами z и y абразивного зерна в процессе резания:

$$z = -K_{uz} \cdot y + V_0 \cdot \sqrt{\frac{2m \cdot y}{P_y}}. \quad (7)$$

Приведенное выше решение дает общее представление о характере движения абразивного зерна массой m в процессе его взаимодействия с обрабатываемым материалом под действием неизменяющихся (постоянных) во времени составляющих силы резания P_z и P_y . В действительности, составляющие силы резания зависят от фактической толщины среза, которая в связи с перемещением абразивного зерна вдоль оси ou будет изменяться. Исходя из этого, составляющие силы резания P_z и P_y определяются:

$$\begin{cases} P_z = v \cdot (a - y) \cdot \sigma; \\ P_y = \frac{v \cdot (a - y) \cdot \sigma}{K_{ш}}, \end{cases} \quad (8)$$

где a , v – толщина и ширина среза, м; σ – условное напряжение резания, Н/м².

В первом приближении будем считать, что σ – постоянная величина. Тогда уравнение движения абразивного зерна в направлении оси ou примет вид

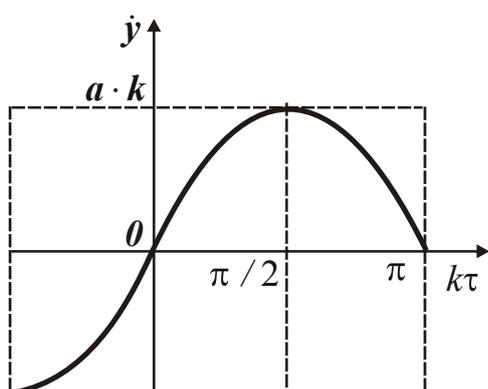
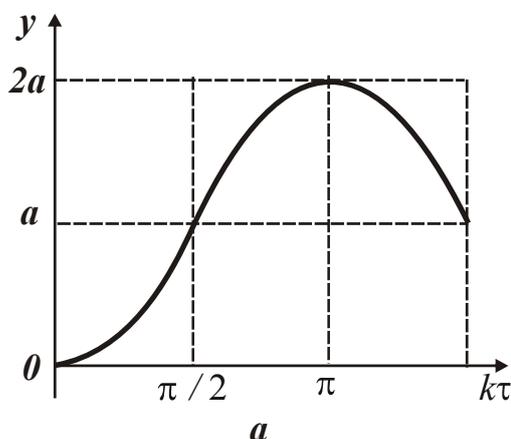


Рис. 2. Характер изменения координаты y (а) и скорости \dot{y} (б) абразивного зерна с течением времени обработки τ .

гармоническому закону, увеличиваясь в диапазоне $k\tau = 0 \dots \pi$ от 0 до $2a$. Очевидно, в реальных условиях координата y не может превышать толщину среза a . Поэтому решением дифференциального уравнения (9) является диапазон изменения величины $k\tau = 0 \dots \pi/2$. При условии $k\tau = \pi/2$ абразивное зерно выходит из контакта с обрабатываемым материалом. Тогда время τ зерна в обрабатываемом материале определится зависимостью

$$\tau = \frac{\pi}{2k} = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{m \cdot K_{ш}}{v \cdot \sigma}}. \quad (12)$$

Время τ тем больше, чем больше масса абразивного зерна m , коэффициент $K_{ш} = P_z / P_y$ и меньше ширина среза v и условное напряжение резания σ . Скорость перемещения абразивного зерна $\dot{y}(\tau)$ в обрабатываемом материале в направлении оси ou , исходя из зависимости (11), подчиняется синусоидальному

$$m \cdot \ddot{y} = \frac{v \cdot (a - y) \cdot \sigma}{K_{ш}} \quad \text{или}$$

$$\ddot{y} + k^2 \cdot y = \frac{v \cdot a \cdot \sigma}{m \cdot K_{ш}}, \quad (9)$$

$$\text{где } k^2 = \frac{v \cdot \sigma}{m \cdot K_{ш}}.$$

Частное решение дифференциального уравнения (9): $y = A$, где $A = a$.

Общее решение дифференциального уравнения (9):

$$y = C_1 \cdot \sin k\tau + C_2 \cdot \cos k\tau + a, \quad (10)$$

где C_1, C_2 – постоянные интегрирования, определяются из начальных условий (3).

Подчиняя полученное решение (10) начальным условиям (3), имеем

$$y = a \cdot (1 - \cos k\tau). \quad (11)$$

Графически зависимость (11) показана на рис. 2,а. Как видно, с течением времени τ координата y абразивного зерна изменяется по

закону: $\dot{y}(\tau) = a \cdot k \cdot \sin k\tau$, рис. 2,б. При изменении угла $k\tau$ в пределах $0 \dots \pi/2$ скорость $\dot{y}(\tau)$ возрастает. Следовательно, при контакте абразивного зерна с обрабатываемым материалом скорость $\dot{y}(\tau)$ изменяется в пределах от 0 до максимального значения $a \cdot k$, что обусловлено действием “выталкивающей” силы P_y . Зная характер изменения координаты y во времени, можно по зависимости (8) определить силы резания P_z и P_y :

$$\begin{cases} P_z = v \cdot a \cdot \sigma \cdot \cos k\tau; \\ P_y = \frac{v \cdot a \cdot \sigma \cdot \cos k\tau}{K_{uu}}. \end{cases} \quad (13)$$

Как видно, составляющие силы резания P_z и P_y изменяются по закону косинуса, т.е. в начальный момент времени они принимают максимальные значения, а затем уменьшаются вплоть до нуля (при $k\tau = \pi/2$) в момент выхода абразивного зерна из контакта с обрабатываемым материалом.

Учитывая переменный характер составляющих силы резания во времени, уточним полученное выше решение (2) для условия $P_z = const$. Дифференциальное уравнение движения абразивного зерна в направлении оси oz с учетом зависимости (13) примет вид

$$m \cdot \ddot{z} = -a \cdot v \cdot \sigma \cdot \cos k\tau. \quad (14)$$

Частное решение уравнения (14) будем искать в виде $z = A_1 \cdot \cos k\tau$, где A_1 – неопределенная величина. Подставим данное решение в уравнение (14):

$$A_1 = a \cdot K_{uu}. \quad (15)$$

Общее решение уравнения (14): $z = C_1 \cdot \tau + C_2 + A_1 \cdot \cos k\tau$, где C_1, C_2 – постоянные интегрирования, определяются из начальных условий (3). Подчиняя полученное решение начальным условиям (3), получим: $C_1 = V_0; C_2 = -a \cdot K_{uu}$.

Тогда

$$z = V_0 \cdot \tau - a \cdot K_{uu} \cdot (1 - \cos k\tau); \quad \dot{z} = V_0 - a \cdot K_{uu} \cdot k \cdot \sin k\tau. \quad (16)$$

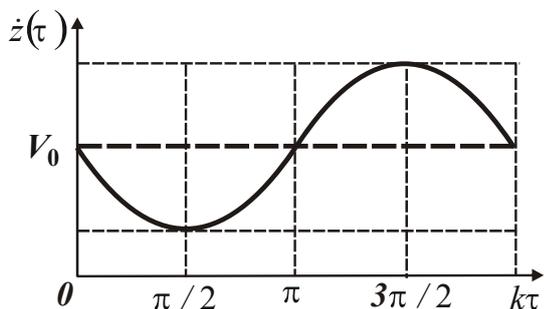


Рис. 3. Характер изменения скорости $\dot{z}(\tau)$ движения абразивного зерна с течением времени обработки τ .

Как видно, с течением времени τ скорость движения абразивного зерна $\dot{z}(\tau)$ в направлении оси oz в диапазоне $0 < k\tau < \pi/2$ уменьшается, рис. 3. Таким образом показано, что с течением времени τ скорость движения абразивного зерна $\dot{y}(\tau)$ увеличивается, а скорость $\dot{z}(\tau)$, наоборот, уменьшается вплоть до нуля. В итоге зерно под действием “выталкивающей” силы P_y

стремится выйти из контакта с обрабатываемым материалом. При условии $\dot{z}(\tau) = 0$ абразивное зерно остановится. Исходя из данного условия с учетом зависимости (16), определим время контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом:

$$\sin k\tau = \frac{V_0}{a} \cdot \sqrt{\frac{m}{v \cdot \sigma \cdot K_{uu}}} \quad \text{или} \quad k\tau = \arcsin \frac{V_0}{a} \cdot \sqrt{\frac{m}{v \cdot \sigma \cdot K_{uu}}}. \quad (17)$$

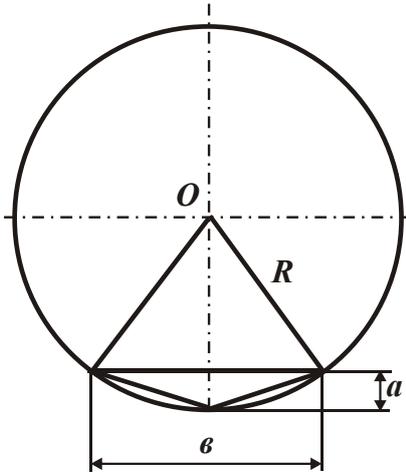


Рис. 4. Расчетная схема параметров среза абразивным зерном.

Из зависимости (24) следует, что чем больше V_0 , m и меньше a , v , K_{uu} , σ , тем больше $k\tau$, т.е. время контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом и соответственно выше эффективность процесса обработки. При $k\tau < \pi/2$, исходя из рис. 2, абразивное зерно остановится в обрабатываемом материале. При $k\tau > \pi/2$, наоборот, кинетической энергии абразивного зерна будет достаточно, чтобы выйти из контакта с обрабатываемым материалом без остановки и осуществить полный срез обрабатываемого материала.

Произведем расчет величины $k\tau$ для следующих исходных данных: $V = 30$ м/с; $a = 3$ мкм; $\sigma = 1000$ кГс/мм²; $K_{uu} = 0,5$. Массу абразивного

зерна m определим по зависимости $m = \rho \cdot v$, где ρ – плотность абразивного материала (для алмаза $\rho = 3,5$ г/см³); $v = \pi \cdot D^3 / 6$ – объем абразивного зерна (в форме шара диаметром D). Примем $D = 50$ мкм. Ширину среза b , образованном абразивным зерном в форме шара радиусом R (рис. 4), определим по зависимости $b = 2 \cdot \sqrt{R^2 - (R - a)^2} \approx 2 \cdot \sqrt{2R \cdot a} = 2 \cdot \sqrt{D \cdot a}$. Подставляя исходные данные в зависимость (17), получено $\sin k\tau = 0,432$, соответственно $k\tau \approx 26^\circ$. Следовательно, справедливо условие $k\tau < \pi/2$ и абразивное зерно остановится в обрабатываемом материале, образуя неполный срез.

Необходимо отметить, что данный расчет является упрощенным, т.к. в нем при получении зависимостей (8) для определения составляющих силы резания P_z и P_y толщина и ширина среза рассматривались не взаимосвязанными. В действительности, исходя из приведенной выше зависимости, эти параметры связаны нелинейной зависимостью. Тогда площадь среза равна $S = 0,5 \cdot a \cdot b = a \cdot \sqrt{D \cdot a}$. С учетом перемещения абразивного зерна в направлении оси ou площадь среза выразится $S = D^{0,5} \cdot (a - y)^{1,5}$. Соответственно, P_z и P_y , определяемые зависимостями (8), примут вид

$$\begin{cases} P_z = (a - y)^{1,5} \cdot D^{0,5} \cdot \sigma; \\ P_y = \frac{(a - y)^{1,5} \cdot D^{0,5} \cdot \sigma}{K_{uu}}. \end{cases} \quad (18)$$

Уравнение движения абразивного зерна в направлении оси ou примет вид

$$m \cdot \ddot{y} = \frac{(a - y)^{1,5} \cdot D^{0,5} \cdot \sigma}{K_{uu}}. \quad (19)$$

В итоге пришли к нелинейному дифференциальному уравнению второго порядка. Чтобы его решить, выполним подстановку $y_1 = a - y$, где y_1 – новая переменная. Тогда уравнение (19) выразится

$$\ddot{y}_1 + k_1^2 \cdot y_1^{1,5} = 0, \quad (20)$$

где $k_1^2 = \frac{D^{0,5} \cdot \sigma}{m \cdot K_{us}}$.

В работе [4] приведено решение данного класса нелинейных дифференциальных уравнений, имеющих вид

$$\ddot{y}_1 + k_1^2 \cdot y_1^n = 0, \quad (21)$$

где n – переменная величина.

Для решения уравнения (21) вводится новая переменная $p = \frac{dy_1}{d\tau}$, тогда

$$\frac{d^2 y_1}{d^2 \tau} = p \cdot \frac{dp}{dy_1} \text{ и (21) запишется } \frac{1}{k_1^2} \cdot p \cdot dp = -y_1^n \cdot dy_1. \text{ После интегрирования,}$$

$$\text{имеем } \frac{1}{k_1^2} \cdot \frac{p^2}{2} = -\frac{1}{1+n} \cdot y_1^{1+n} + C_1 \text{ или } \frac{p}{k_1} = \sqrt{C_2^2 - \frac{2}{1+n} \cdot y_1^{1+n}}, \text{ где } C_2^2 = 2 \cdot C_1;$$

C_1 – постоянная интегрирования, определяется из начального условия.

Представляя $p = \frac{dy_1}{d\tau}$, получим уравнение: $\frac{1}{k_1} \cdot \frac{dy_1}{d\tau} = \sqrt{C_2^2 - \frac{2}{1+n} \cdot y_1^{1+n}}$. Ин-

тегрируя его, получим $\sqrt{\frac{2 \cdot y_1^{1+n}}{(1+n) \cdot C_2^2}} = \sin(k_1 \tau + C_3)$, где C_3 – постоянная интегри-

рования, определяется из начального условия. Откуда

$$y_1 = \left[\frac{(1+n) \cdot C_2^2}{2} \right]^{\frac{1}{1+n}} \cdot \sin^{1+n}(k_1 \tau + C_3). \text{ В нашем случае } n=1,5. \text{ Тогда зависимость}$$

примет вид $y_1 = \left[\frac{2,5 \cdot C_2^2}{2} \right]^{0,4} \cdot \sin^{0,8}(k_1 \tau + C_3)$. С учетом $y_1 = a - y$, имеем

$$y = a - \left[\frac{2,5 \cdot C_2^2}{2} \right]^{0,4} \cdot \sin^{0,8}(k_1 \tau + C_3). \text{ Постоянные интегрирования } C_2 \text{ и } C_3 \text{ опре-}$$

делим из начальных условий (3): $C_2^2 = \frac{a^{2,5}}{1,25}$; $C_3 = \frac{\pi}{2}$. Окончательно имеем

$$y = a \cdot \left(1 - \cos^{0,8} k_1 \tau \right). \quad (22)$$

В итоге пришли к зависимости, близкой к аналогичной зависимости (11), полученной без учета взаимосвязи параметров a и b . Следовательно, нелинейность дифференциального уравнения (20) не вносит принципиальных изменений в характер перемещения обрабатываемого зерна в обрабатываемом материале. Поэтому с достаточной для практики точностью можно пользоваться

упрощенным решением (11).

Рассмотрим случай резания абразивным зерном, движущимся с начальной скоростью V_0 и входящим в обрабатываемый материал под некоторым углом α . В процессе резания на зерно действуют тангенциальная P_z и радиальная P_y составляющие силы резания. Определим траекторию движения зерна в обрабатываемом материале. Составляющие силы резания P_z и P_y , описываемые зависимостями (8), с учетом $a = \operatorname{tg}\alpha \cdot z$ представим в виде

$$\begin{cases} P_z = v \cdot (\operatorname{tg}\alpha \cdot z - y) \cdot \sigma; \\ P_y = \frac{v \cdot (\operatorname{tg}\alpha \cdot z - y) \cdot \sigma}{K_{uu}}. \end{cases} \quad (23)$$

В данном случае P_z и P_y зависят от двух координат: y и z . Движение абразивного зерна в обрабатываемом материале описывается системой дифференциальных уравнений (1). Подставляя зависимости (23) в (1), имеем

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{z} + v \cdot \sigma \cdot \operatorname{tg}\alpha \cdot z = v \cdot \sigma \cdot y; \\ m \cdot \ddot{y} + \frac{v \cdot \sigma}{K_{uu}} \cdot y = \frac{v \cdot \sigma \cdot \operatorname{tg}\alpha}{K_{uu}} \cdot z. \end{cases} \quad (24)$$

В итоге пришли к сложным дифференциальным уравнениям, содержащим по две неизвестные величины y и z . Для того чтобы привести уравнения к одной неизвестной, умножим второе уравнение на коэффициент K_{uu} и просуммируем первое и второе уравнения. В результате получим $\ddot{z} + K_{uu} \cdot \ddot{y} = 0$. Интегрируя уравнение с учетом начальных условий (3), имеем

$$\begin{cases} \dot{z} + K_{uu} \cdot \dot{y} = V_0; \\ z + K_{uu} \cdot y = V_0 \cdot \tau. \end{cases} \quad (25)$$

Откуда $z = V_0 \cdot \tau - K_{uu} \cdot y$; $\ddot{z} = -K_{uu} \cdot \ddot{y}$. Подставим эти выражения в первое уравнение системы (24): $m \cdot K_{uu} \cdot \ddot{y} + v \cdot \sigma \cdot \operatorname{tg}\alpha \cdot (V_0 \cdot \tau - K_{uu} \cdot y) = v \cdot \sigma \cdot y$ или

$$\ddot{y} + k^2 \cdot y = \frac{v \cdot \sigma \cdot \operatorname{tg}\alpha \cdot V_0}{m \cdot K_{uu}} \cdot \tau, \quad (26)$$

где $k^2 = \frac{v \cdot \sigma \cdot (1 + \operatorname{tg}\alpha \cdot K_{uu})}{m \cdot K_{uu}}$.

Частное решение дифференциального уравнения (26): $y = A \cdot \tau$. Подставляя его в дифференциальное уравнение (26), имеем $A = \frac{V_0 \cdot \operatorname{tg}\alpha}{(1 + \operatorname{tg}\alpha \cdot K_{uu})}$.

Общее решение дифференциального уравнения (26) общеизвестно: $y = C_1 \cdot \sin k\tau + C_2 \cdot \cos k\tau + A \cdot \tau$, где C_1, C_2 – постоянные интегрирования, определяются из начальных условий (3): $C_1 = -A/k$ и $C_2 = 0$. Тогда

$$y = A \cdot \left(\tau - \frac{1}{k} \cdot \sin k\tau \right); \quad \dot{y} = A \cdot (1 - \cos k\tau). \quad (27)$$

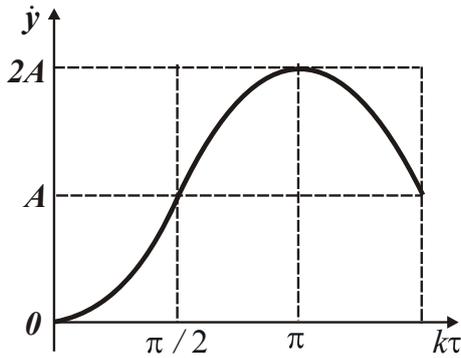


Рис. 5. Зависимость скорости движения \dot{y} абразивного зерна от угла $k\tau$.

С течением времени τ скорость \dot{y} увеличивается в диапазоне $k\tau \leq \pi$, рис. 5. Характер изменения координаты z и \dot{z} определим на основе (25) и (27):

$$z = \frac{V_0}{(1 + \operatorname{tg}\alpha \cdot K_{uu})} \cdot \left(\tau - \frac{\operatorname{tg}\alpha \cdot K_{uu}}{k} \cdot \sin k\tau \right);$$

$$\dot{z} = \frac{V_0}{(1 + \operatorname{tg}\alpha \cdot K_{uu})} \cdot (1 + \operatorname{tg}\alpha \cdot K_{uu} \cdot \cos k\tau). \quad (28)$$

Определим глубину внедрения абразивного зерна в обрабатываемый материал h , для чего воспользуемся зависимостью $h = h_1 \cdot \cos \alpha$,

полученной на основе расчетной схемы, показанной на рис. 6, с учетом $h_1 = z \cdot \operatorname{tg}\alpha - y$. С учетом зависимостей (27) и (28), имеем

$$h = \frac{V_0 \cdot \sin \alpha}{k} \cdot \sin k\tau. \quad (29)$$

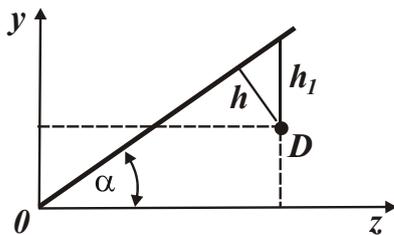


Рис. 6. Расчетная схема глубины внедрения абразивного зерна в обрабатываемый материал h .

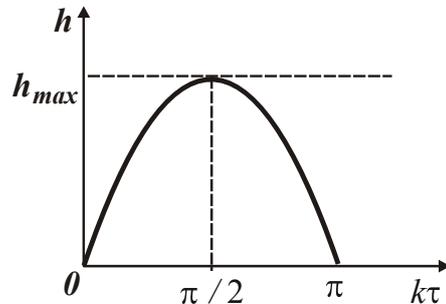


Рис. 7. Зависимость глубины внедрения абразивного зерна в обрабатываемый материал h от угла $k\tau$.

Определим глубину внедрения абразивного зерна в обрабатываемый материал h , для чего воспользуемся зависимостью $h = h_1 \cdot \cos \alpha$, полученной на основе расчетной схемы, показанной на рис. 6, с учетом $h_1 = z \cdot \operatorname{tg}\alpha - y$. С учетом зависимостей (27) и (28), имеем

$$h = \frac{V_0 \cdot \sin \alpha}{k} \cdot \sin k\tau. \quad (29)$$

В результате пришли к довольно простой зависимости, из которой следует синусоидальный закон изменения глубины h с течением времени τ контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом, рис. 7. Очевидно, максимальное значение h достигается при условии $k\tau = \pi/2$, а наименьшее $h=0$ – в момент выхода зерна из контакта с материалом (при $k\tau = \pi$). Тогда

$$h_{max} = V_0 \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{\frac{m \cdot K_{uu}}{b \cdot \sigma \cdot (1 + \operatorname{tg}\alpha \cdot K_{uu})}}. \quad (30)$$

Условное напряжение резания σ определяется зависимостью, приведенной в нашей работе [4] для случая, когда передний угол режущего инструмента $\gamma=0$:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot \cos \psi \cdot \cos \alpha}{[1 - \sin(\alpha + \psi)]}, \quad (31)$$

где $\tau_{\text{сдв}}$ – предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала, Н/м²; ψ – условный угол трения режущего инструмента (абразивного зерна) с обрабатываемым материалом; $\text{tg} \psi = f$ – коэффициент трения абразивного зерна с обрабатываемым материалом.

Подставляя зависимость (31) в (29) с учетом $K_{\text{ш}} = \text{ctg} \psi$ [4], имеем

$$h_{\text{max}} = V_0 \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{\frac{m}{2 \cdot v \cdot \tau_{\text{сдв}}} \cdot \left[\frac{1}{\sin(\alpha + \psi)} - 1 \right]}. \quad (32)$$

Как видно, максимальная глубина внедрения абразивного зерна в обрабатываемый материал h_{max} тем больше, чем больше начальная скорость движения абразивного зерна V_0 , его масса m и меньше ширина среза v и предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала $\tau_{\text{сдв}}$. Угол входа зерна в обрабатываемый материал α неоднозначно влияет на h_{max} . За счет увеличения $\sin \alpha$ глубина h_{max} будет увеличиваться, а при достижении условия $\sin(\alpha + \psi) = 1$ справедливо $h_{\text{max}} = 0$, т.е. имеет место экстремум (максимум) глубины h_{max} от угла α . Для его определения подчиним функцию h_{max} необходимому условию экстремума: $(h_{\text{max}})'_{\alpha} = 0$. В итоге получено тригонометрическое уравнение:

$$1 - \sin(\alpha + \psi) = \frac{\text{tg} \alpha}{\text{tg}(\alpha + \psi)}. \quad (33)$$

Расчетами установлено, что при $\psi = 30^\circ$ экстремальное значение угла $\alpha = 16^\circ$. Как видно, максимальная глубина внедрения абразивного зерна в обрабатываемый материал h_{max} достигается при относительно небольшом угле α . При $\alpha > 16^\circ$ параметр h уменьшится.

Представляет интерес анализ координаты экстремальной точки D , в которой реализуется максимальное значение глубины внедрения абразивного зерна в обрабатываемый материал h_{max} . Для этого в зависимости (27) и (28) подставим значение $k\tau = \pi/2$. Тогда

$$y = \frac{0,57 \cdot V_0 \cdot \text{tg} \alpha}{k \cdot (1 + \text{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})}; \quad z = \frac{V_0}{k \cdot (1 + \text{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})} \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \text{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}} \right);$$

$$\dot{y} = \frac{V_0 \cdot \text{tg} \alpha}{(1 + \text{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})}; \quad \dot{z} = \frac{V_0}{(1 + \text{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})}; \quad \frac{\dot{y}}{\dot{z}} = \text{tg} \alpha. \quad (63)$$

Как видно, скорость движения абразивного зерна \dot{y} в направлении оси oy меньше скорости движения абразивного зерна \dot{z} в направлении оси oz . В табл. 1 приведены рассчитанные по зависимостям (63) отношения скоростей V_0 / \dot{y} и V_0 / \dot{z} . Как видно, с увеличением угла α отношение V_0 / \dot{y} уменьшается, а отношение V_0 / \dot{z} , наоборот, увеличивается, принимая значения больше единицы. Это свидетельствует о том, что начальная скорость V_0 движения абразивного

зерна всегда больше текущих значений скоростей \dot{y} и \dot{z} . Заслуживает внимания тот факт, что при $\alpha < 45^\circ$ значения \dot{z} не столь существенно отличаются от начальной скорости V_0 . Следовательно, запаса кинетической энергии движущегося зерна в принципе может быть достаточно для осуществления процесса стружкообразования после прохождения зерном экстремальной точки D . Иными словами, в этом случае зерно может осуществить полный срез обрабатываемого материала. В других случаях, например, при $\alpha > 45^\circ$ из-за недостаточной скорости \dot{z} процесс стружкообразования может прекратиться в экстремальной точке D и полный срез обрабатываемого материала не произойдет, хотя скорость \dot{z} при этом не будет равна нулю.

Таблица 1

Расчетные значения отношения скоростей V_0 / \dot{y} и V_0 / \dot{z}

α , град	10	20	30	45	60	70	80	90
V_0 / \dot{y}	7,4	4,48	3,47	2,73	2,3	2,1	1,9	–
V_0 / \dot{z}	1,3	1,63	2,0	2,73	4,0	5,76	10,83	∞

В момент выхода абразивного зерна из контакта с материалом (т.е. при выполнении условия $k\tau = \pi$) зависимости (27) и (28) примут вид

$$y = \frac{\pi}{k} \cdot \frac{V_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{(1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{uu})}; \quad \dot{y} = \frac{2 \cdot V_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{(1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{uu})}; \quad z = \frac{\pi}{k} \cdot \frac{V_0}{(1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{uu})};$$

$$\dot{z} = \frac{V_0}{(1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{uu})} \cdot (1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{uu}); \quad \frac{y}{z} = \operatorname{tg} \alpha; \quad \frac{\dot{y}}{\dot{z}} = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{(1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{uu})}. \quad (35)$$

Как следует из зависимостей (68), координата y всегда меньше координаты z , а скорость \dot{y} , наоборот, может быть больше скорости \dot{z} .

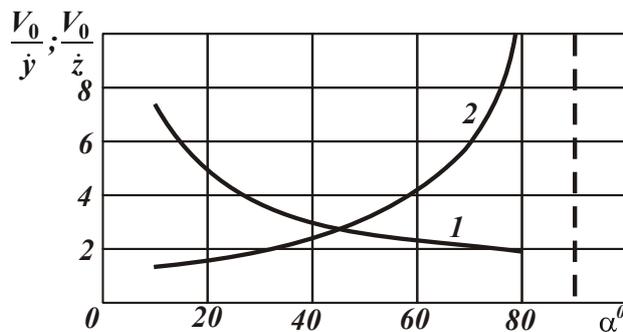


Рис. 8. Зависимости отношения скоростей V_0 / \dot{y} (1) и V_0 / \dot{z} (2) от угла α .

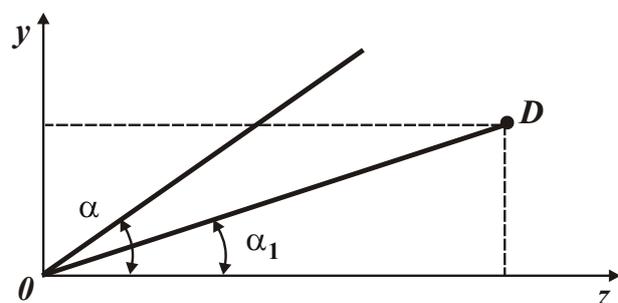


Рис. 9. Расчетная схема траектории движения абразивного зерна в обрабатываемом материале.

Для анализа траектории движения абразивного зерна в обрабатываемом материале рассмотрим характер изменения угла α_1 (рис. 9), определяющего положение абразивного зерна в произвольный момент времени (в точке D). Для этого используем зависимости (27) и (28):

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{y}{z} = \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{\left(1 - \frac{\sin k\tau}{k\tau}\right)}{\left(1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{uu} \cdot \frac{\sin k\tau}{k\tau}\right)}. \quad (36)$$

Как видно, с течением времени τ отношение $\sin k\tau/k\tau$ будет уменьшаться, а $\operatorname{tg}\alpha_1$ увеличиваться. При определенном значении τ угол α_1 станет равным углу α и произойдет выход абразивного зерна из контакта с обрабатываемым материалом. Очевидно, данное условие выполнимо при $\sin k\tau = 0$, т.е. $k\tau = \pi$. Координаты точки D (рис. 9) определяются подстановкой данного условия в зависимости (27) и (28):

$$y = \frac{\pi}{k} \cdot \frac{V_0 \cdot \operatorname{tg}\alpha}{(1 + \operatorname{tg}\alpha \cdot K_{uu})}; \quad z = \frac{\pi}{k} \cdot \frac{V_0}{(1 + \operatorname{tg}\alpha \cdot K_{uu})}. \quad (37)$$

В результате пришли к зависимостям (35). Из зависимостей (37) следует, что отношение $y/z = \operatorname{tg}\alpha$ (рис. 9), т.е. расчеты выполнены правильно. Координаты y и z однозначно увеличиваются с увеличением начальной скорости движения абразивного зерна V_0 и уменьшением коэффициента k .

Установим расстояние от начала координат (рис. 9) до точки выхода зерна из обрабатываемого материала, т.е. расстояние $OD=l$:

$$l = \frac{\pi \cdot V_0}{\cos \alpha \cdot (1 + \operatorname{tg}\alpha \cdot K_{uu})} \cdot \sqrt{\frac{m \cdot K_{uu}}{v \cdot \sigma \cdot (1 + \operatorname{tg}\alpha \cdot K_{uu})}}. \quad (38)$$

Расстояние $OD=l$ по физической сути определяет длину риски-царапины абразивным зерном при условии образования полного среза, т.е. осуществления процесса стружкообразования на всей длине l . В противном случае риска-царапина будет равна длине пути зерна в обрабатываемом материале до момента прекращения процесса стружкообразования (расстоянию OD , показанному на рис. 6), что меньше длины l .

Исходя из зависимости (38), длина риски-царапины абразивным зерном l тем больше, чем больше параметры V_0 , m , K_{uu} и меньше v и σ . Угол входа зерна в обрабатываемый материал α неоднозначно влияет на длину l . С одной

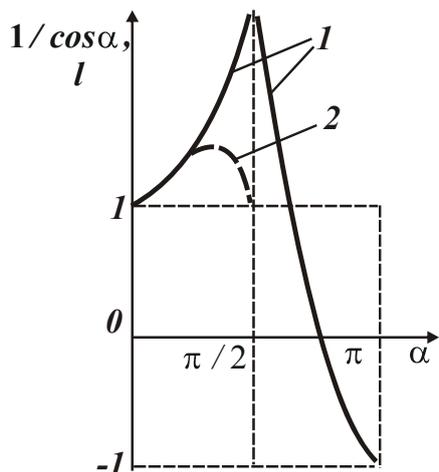


Рис. 10. Характер изменения функции $1/\cos \alpha$ (1) и длины риски-царапины абразивным зерном l (2) от угла α .

метрическому уравнению:

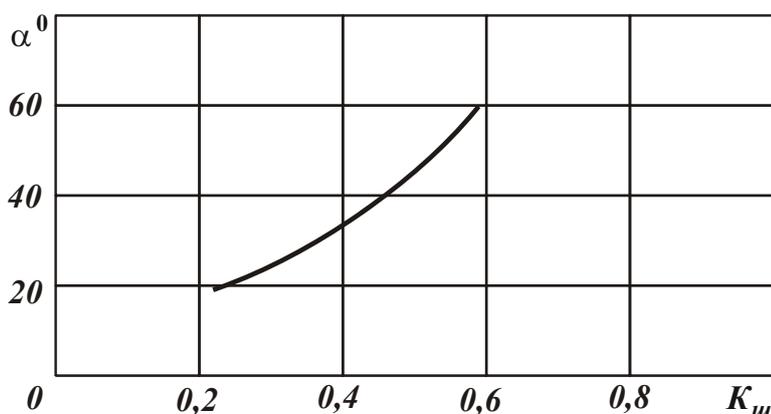
$$0,5 \cdot \sin 2\alpha + \sin^2 \alpha \cdot K_{uu} = 1,5 \cdot K_{uu}. \quad (39)$$

сторона, с увеличением угла α за счет уменьшения $\cos \alpha$ длина l будет увеличиваться до бесконечности (при $\alpha \rightarrow \pi/2$), рис. 10. С другой стороны, за счет увеличения функции $\operatorname{tg}\alpha \rightarrow \infty$ при $\alpha \rightarrow \pi/2$ длина l будет уменьшаться. Следовательно, существует экстремальное значение угла α , при котором длина риски-царапины абразивным зерном l будет максимальной, а процесс струйно-абразивной обработки – наиболее эффективным с точки зрения интенсивности съема припуска.

Для определения экстремума функции l , подчиним зависимость (38) необходимому условию экстремума: $l'_\alpha = 0$. В результате после несложных вычислений приходим к тригонометрическому уравнению:

Расчетные значения экстремального угла α

$K_{ш}$	0,23	0,35	0,5	0,58
α , град	20	30	45	60

Рис. 11. Зависимость экстремального угла α от коэффициента $K_{ш}$.

В табл. 2 и на рис. 11 приведены расчетные значения экстремального угла α от коэффициента $K_{ш}$. Как видно, с увеличением $K_{ш}$ угол α увеличивается, а это, согласно зависимости (38) и рис. 10, ведет к увеличению длины риски-царапины абразивным зерном l , что способствует повышению производительности обработки.

Таким образом, на основе зависимости (38) обоснованы основные условия увеличения длины риски-царапины абразивным зерном l и соответственно основные направления повышения эффективности струйно-абразивной обработки.

Проведенный анализ справедлив для одного и того же значения условного напряжения резания σ . Однако, исходя из зависимости (31), условное напряжение резания σ в значительной мере зависит от угла α . Это вносит изменение в зависимость (38), которая после подстановки в нее зависимости (31) с учетом условия $K_{ш} = ctg\psi$ выразится

$$l = \pi \cdot V_0 \cdot \sin\psi \cdot \sqrt{\frac{m \cdot [1 - \sin(\alpha + \psi)]}{2 \cdot \tau_{сдв} \cdot v \cdot \sin^3(\alpha + \psi)}}. \quad (40)$$

Как видно, с увеличением угла α длина риски-царапины абразивным зерном l однозначно уменьшается и при условии $(\alpha + \psi) = \pi/2$ равна нулю. Это отличается от вышеприведенного решения, вытекающего из зависимости (38) и показанного графически на рис. 10 для случая $\sigma = const$, согласно которому длина l с увеличением угла α изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку максимума.

Таким образом установлено, что наибольшая длина риски-царапины абразивным зерном l достигается при угле входа зерна в обрабатываемый материал $\alpha = 0$, а наибольшая глубина риски-царапины h_{max} (как показано выше) – при угле $\alpha = 16^\circ$ (для $\psi = 30^\circ$). Следовательно, наиболее благоприятные условия резания-царапания абразивными зернами обеспечивается при относительно небольших значениях угла α . В этом случае возможно образование полного среза (т.е. полной риски-царапины) и осуществление достаточно интенсивного съема обрабатываемого материала. Причем, с увеличением условного угла трения режущего зерна с обрабатываемым материалом ψ угол α (при котором $l \rightarrow 0$ и выполняется условие $(\alpha + \psi) = \pi/2$) уменьшается, т.е. для повышения эффек-

тивности обработки необходимо угол ψ и соответственно коэффициент трения абразивного зерна с обрабатываемым материалом уменьшать.

Данное решение получено для нулевого переднего угла режущего зерна ($\gamma=0$). В действительности абразивное зерно имеет отрицательный передний угол и поэтому коэффициент $K_{рез}$ описывается зависимостью [4]:

$$K_{рез} = ctg(\psi + \gamma). \text{ Тогда (32) и (40) для определения } h_{max} \text{ и } l \text{ примут вид}$$

$$h_{max} = V_0 \sin\alpha \sqrt{\frac{m}{2\epsilon\tau_{сдв}} \left[\frac{1}{\sin(\alpha + \psi + \gamma)} - 1 \right]}; \quad l = \pi V_0 \sin(\psi + \gamma) \sqrt{\frac{m \cdot [1 - \sin(\alpha + \psi + \gamma)]}{2\tau_{сдв} \epsilon \sin^3(\alpha + \psi + \gamma)}}. \quad (41)$$

Как следует из зависимостей (41), с увеличением отрицательного переднего угла режущего зерна γ параметры h_{max} и l уменьшаются и условие $l \rightarrow 0$ (соответствующее условию $(\alpha + \psi) = \pi / 2$) выполняется при меньших значениях угла α . Следовательно, для увеличения параметров h_{max} и l необходимо уменьшать отрицательный передний угол режущего зерна γ .

Литература: 1. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин / А.Е. Проволоцкий. – К.: Техника, 1989. – 277 с. 2. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 4. "Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с. 3. Андилахай А.А. Абразивная обработка деталей затопленными струями / А.А. Андилахай. – Мариуполь: ПГТУ, 2006. – 190 с. 4. Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.

УДК 621.9

ПРИНЦИП ПОДОБИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Ларшин В.П., докт. техн. наук, **Якимов А.В.**, докт. техн. наук
(г. Одесса, Украина)

Technical systems similarity principle for the constructions (similarity of product and product manufacturing system) and the processes (similarity of manufacturing process and operating one) at different stages of product life cycle engineering is identified and showed on the examples.

Под техническими системами в машиностроении понимают либо конструкцию (техническая система – конструкция), либо процесс (техническая система – процесс). Известно, что исполнительные поверхности деталей машин формируются на этапе их механической обработки (технологический процесс) при одновременном сочетании механических, физических, химических и других воздействий. В процессе эксплуатации те же самые поверхности деталей испытывают определённое сочетание *подобных* механико-физико-химических воздействий, т.е. имеется некоторое *подобие процессов* на этапах изготовления детали и её эксплуатации [1]. Например, на химическое, силовое и температурное воздействия при обработке детали на различных операциях существенное влияние оказывают смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС). Эти СОТС могут быть твёрдыми, пластичными, жидкими и газообразными.

При эксплуатации этой детали на подобные (химическое, силовое и температурное) воздействия оказывают влияние смазочные вещества (твёрдые, пластичные, жидкие и газообразные). Эти смазочные вещества являются конструкционным материалом, необходимым для нормальной работы машины. В обоих случаях (при изготовлении и эксплуатации) имеется движущаяся зона контакта взаимодействующих тел, в которой проявляются указанные воздействия.

Аналогичные рассуждения можно привести, имея в виду кинематическое и физическое воздействия, которые также проявляются в зоне контакта взаимодействующих тел. Что же представляет собой указанная зона контакта? В первом случае (при обработке детали) – это зона контакта режущего инструмента (первое тело) и обрабатываемой детали (второе тело). Во втором (при эксплуатации детали) – это зона контакта сопрягаемых деталей в работающем механизме или узле. Например, подвижная зона контакта шарика и дорожки качения подшипника, или зона контакта двух сопрягаемых боковых поверхностей зубьев, принадлежащих разным зубчатым колёсам.

В этой связи необходимо разделить все смазочные материалы (СМ) на два класса по характеру их применения [2]. Первый класс СМ – для уменьшения износа сопряжённых деталей машин. Здесь СМ являются конструкторскими материалами, без которых работа механизма (машины) часто невозможна. В этом случае СМ не должны быть разрушающими. Они должны быть сохраняющими или даже восстанавливающими. Второй класс СМ – для повышения эффективности технологических процессов механической обработки заготовок и деталей машин (резание, шлифование, штамповка и т.п.). Здесь СМ используются для улучшения обрабатываемости материала заготовок и могут быть разрушающими по отношению к нему, т.е. снижающими механические характеристики обрабатываемого материала. В тоже время СМ не должны разрушать режущий инструмент.

В первом случае СМ подбирают исходя из обеспечения требований сохранения и модификации свойств поверхностного слоя детали в процессе её эксплуатации. Слой СМ резко уменьшает коэффициент трения и создаёт рабочую среду для диффузионного насыщения поверхностного слоя детали веществами, которые входят в состав СМ.

Во втором случае СМ (т.е. СОТС) должны выполнять более сложную функцию. По отношению к режущему инструменту свойства СМ должны быть такими же, как в первом случае, т.е. СМ должны уменьшать коэффициент трения и создавать защитные плёнки на рабочей части режущего инструмента. Однако, по отношению к обрабатываемому материалу заготовки СМ должны иметь разрушающие свойства. Причём при обработке металлов резанием СОТС попадают на сопряжённые детали технологического оборудования, относительно которых СОТС должны действовать как обычные СМ первого класса.

Таким образом, требования к СОТС противоречивы: СОТС должны избирательно разрушать (снижать механические характеристики) обрабатываемый материал заготовки и в то же время не оказывать отрицательного воздействия на режущий инструмент и механизмы технологического оборудования.

В учении о СМ большое значение имеют работы академиков Петра Алек-

сандровича Ребиндера (1898-1972) и Бориса Владимировича Дерягина (1902-1994). Эти работы показали, что компоненты СОТС, содержащие поверхностно-активные вещества (ПАВ), принимают активное участие в процессе резания. Активные вещества вследствие их сродства с металлами быстро притягиваются и ориентируются на поверхности металлов, создают смазку на этих поверхностях и этим облегчают процесс резания. Кроме того, ПАВ способствуют уменьшению механического сопротивления (пластические и упругие деформации) обрабатываемого материала (эффект Ребиндера)

Трение и связанный с ним износ при резании металлов отличаются от трения и износа поверхностей деталей машин при их эксплуатации (при выполнении функции машины). Различие состоит в том, что при резании металлов имеет место трение между изнашиваемым лезвием инструмента и ювенильной поверхностью обрабатываемой заготовки. Это трение происходит при значительно большем давлении и на относительно малых поверхностях контакта.

Механизм износа инструмента при резании металлов очень сложный. Тут имеют место три основных вида износа: абразивно-механический (царапание), адгезионный (схватывание) и диффузионный (растворение) [3, с.168]. Удельное влияние каждого из них зависит от свойств контактирующих материалов инструмента и детали, условий обработки и т.п.

Рассмотренное выше физико-химико-механическое подобие процессов в зоне контакта на этапе обработки детали и этапе её эксплуатации позволяет переносить финишные операции обработки поверхностей деталей на этап их эксплуатации. Это оказывается полезным, например, для уменьшения длительности и улучшения качества приработки новых деталей в процессе их эксплуатации. Например, для повышения долговечности пар трения необходимо, с одной стороны, максимально уменьшить их приработку в процессе эксплуатации, а с другой – повысить эффективность приработки в процессе эксплуатации. Этому добиваются, с одной стороны, финишной обработкой поверхностей трения, которая воспроизводит условия эксплуатации (моделирует ускоренный процесс их приработки). С другой – переносят ускоренную приработку на этап эксплуатации, добавляя в смазочный материал специальные "подшлифовочные" микророшки, например, серпентинита (частицы размером 1–20 мкм). Эти микророшки не столько удаляют материал, сколько подготавливают поверхности с очагами износа для их последующего восстановления с целью оптимизации зазоров в работающем соединении деталей.

В ряде случаев условия обработки ответственных поверхностей не соответствуют условиям их эксплуатации. Это имеет место, например, при обработке уплотнительных поверхностей запорной арматуры. Финишная обработка уплотнительных поверхностей (притирка) осуществляется с применением притирочных паст, содержащих смазочные составы, а эксплуатация этих поверхностей производится без применения смазочных составов, так как обработанные (притёртые) поверхности подвергаются воздействию агрессивной среды. Например, в условиях работы коммунальных предприятий крупных городов Украины (а также химических цехов электростанций) применяемая арматура имеет контакты со следующими агрессивными средами [4, с.5]: сырая вода с

механическими примесями **В** виде песка, взвешенных веществ; известкованная и осветленная вода; **H** – катионированная вода; **Na** – катионированная вода; частично и глубоко обессоленная вода; растворы серной кислоты (от следов до 98%); растворы едкого натра (от следов до 42 %); растворы поваренной соли (от следов до 26 %); растворы аммиака, коагулянта, извести, полиакриламида, хлорной извести, соляной кислоты.

Двусторонняя притирка уплотнительных поверхностей корпусов задвижек выполняется головкой, показанной на рис. 1,б [5, с.116]. Боковые пазы в корпусе служат для установки задвижки. Притиры самоустанавливаются на обрабатываемых поверхностях вследствие поджатия их пружиной с помощью пробки. Шарнирное соединение передает вращение от шпинделя станка к коническим шестерням, на которых свободно закреплены притиры. Покачивание и реверс притиров осуществляются таким образом, что повороты притиров различны при прямом и обратном движениях. Траектория движения точек этих притиров близка к окружности, но качество обработки даже выше, чем при односторонней притирке. Производительность обработки при двусторонней притирке значительно выше. Анализ рис.1,б [4,с.10] показывает, что конструкция головки имеет внешнее сходство с конструкцией задвижки (рис.1,а) – объекта изготовления и ремонта.

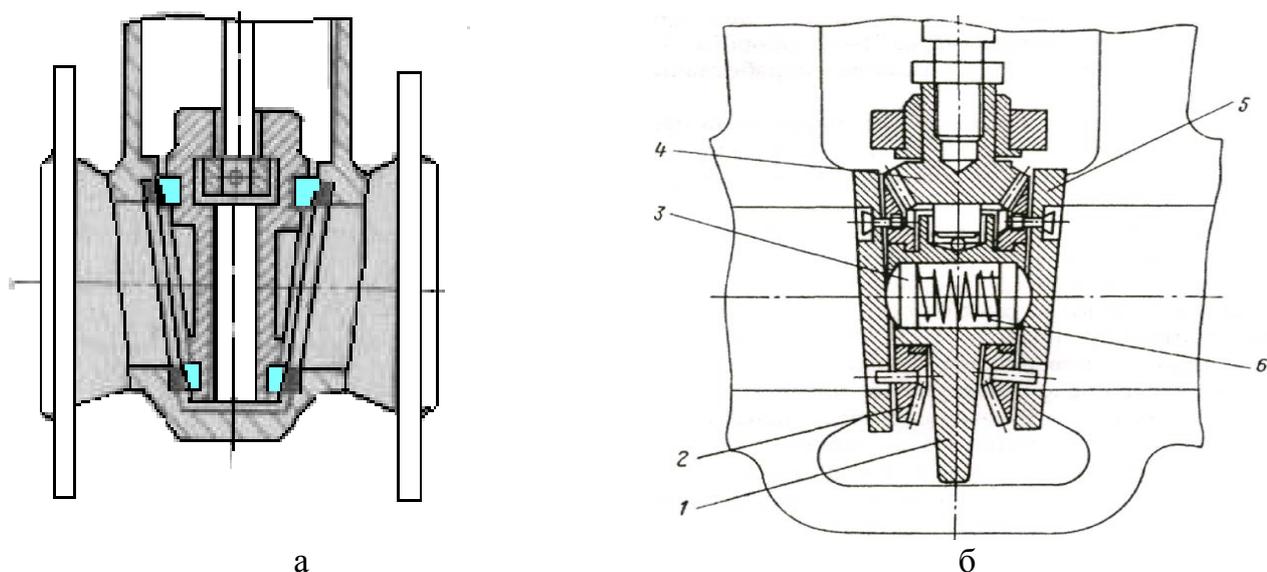


Рисунок. Конструкция клиновой задвижки (а) и головка для одновременной притирки двух уплотнительных поверхностей в корпусе задвижки (б): 1 – корпус; 2 – пара конических шестерен; 3 – пробки; 4 – коническая шестерня; 5 – притиры; 6 – пружина.

Другим примером поверхности, условия обработки которой не соответствуют условиям её эксплуатации, является поверхность канала ствола автомата Калашникова. В канале ствола при эксплуатации автомата могут наблюдаться следующие дефекты [6]:

- сетка разгара в виде пересекающихся тонких линий, как правило, с казенной части; в последующем при стрельбе в местах сетки разгара образуются трещины, и начинается выкрашивание хрома в виде отдельных точек, за-

тем выкрашивание увеличивается и переходит в сколы хрома, при недостаточно тщательной чистке в местах скола хрома может появиться ржавчина;

- раковины – значительные углубления в металле, образовавшиеся в результате большого числа проведенных из ствола выстрелов (разгар ствола) или в результате длительного воздействия ржавчины в местах скола хрома; ствол, в котором образовались сколы хрома или раковины, надо чистить после стрельбы особенно тщательно;
- износ полей или износ переходов полей в нарезы (особенно на их левой грани), заметные на глаз.

По этого примера указанный принцип подобия проявляется в периодической профилактической очистке ствола с помощью переносных инструментов, имеющих некоторую аналогию с теми инструментами, которые применялись при обработке или ремонте ствола. Принадлежность автомата содержит [6]: шомпол, протирку, ершик, отвертку, выколотку, пенал, масленку. Шомпол применяется для чистки и смазки канала ствола, а также каналов и полостей автомата. Он имеет головку с отверстием для выколотки, направляющую часть и конец с резьбой для установки ершика или протирки. Протирка применяется для чистки и смазки канала ствола. Ершик – только для чистки канала ствола специальным раствором. Отвертка и выколотка применяются при разборке и сборке автомата. Затвор автомата (по аналогии с затвором рассмотренной выше задвижки) служит для досылания патрона в патронник, запирания канала ствола, разбивания капсюля и извлечения из патронника гильзы (патрона).

Таким образом, проведенный анализ позволил выявить, что на различных этапах жизненного цикла изделий машиностроения просматривается подобие технических систем как для процессов (обработки и эксплуатации поверхностей деталей машин) так и для конструкций (конструкций механизмов, содержащих детали, и конструкций технологических систем изготовления этих деталей). Этот принцип используется при разработке технологических систем изготовления и ремонта изделий машиностроения, профилактической обработке изделий в межремонтный период, а также при разработке СОТС и смазочных материалов при изготовлении и эксплуатации этих изделий и содержащихся в них деталей.

Литература: 1. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с. 2. Ларшин В.П., Грисенко Е.В., Макаров В.Ф. Проблеми застосування мастильно-охолоджуючих технологічних засобів у техніці й технології / Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- энергосбережении: Материалы научн.-техн. конф. 30 сентября – 1 октября 2008 г., Одесса. – К.: АТМ УКРАИНЫ, 2008. – С. 47-30. 3. Вульф А.М. Резание металлов. Изд. 2-е. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1974. – 496 с. 4. Имбрицкий М.И. Справочник по арматуре и трубопроводам химических цехов электростанций. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 168 с. 5. Технологические процессы изготовления высокоточных деталей гидро- и пневмоаппаратуры: Учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Е.В. Грисенко, В.П. Ларшин, А.А. Якимов, Г.В.Новиков. Под общ. ред. проф. А.В. Якимова. – Одесса: ОНПУ, 2006. – 326 с. 6. Устройство автомата (штурмовой винтовки) – схема, чертёж / <http://www.fire-arms.ru/1.-ustroystvo-avtomata-shturmovoy-vintovki-shema-chertezh.html>.

УДК 621.952

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЛОСКИХ КОЛЬЦЕВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

Линчевский П.А., докт. техн. наук, Буюкли И.М., канд. техн. наук,

Ткаченко Б.О., канд. техн. наук, Новожилов С.В.

(г. Одесса, Украина)

The model of plastic deformation of flat annular friction surfaces. There are dependencies that describe the pathway of the distorting elements and to create friction on surfaces of different mesh terrain maslounderzhivayuschih pockets.

Типовой деталью, имеющей плоскую кольцевую поверхность трения является опорный диск аксиальных поршневых гидромашин. Такие диски изготавливаются из стали ШХ15. Обычная технология обработки поверхностей трения дисков включает операции точения и шлифования. Главным недостатком такой технологии является шаржирование рабочей поверхности трения продуктами абразивного износа шлифовального круга, отсутствие на обработанной поверхности маслосдерживающего регулярного рельефа, а также наличие дефектного слоя в виде «прижогов», обусловленного высокими контактными температурами при шлифовании. Целью настоящей работы является замена операции шлифования на операцию пластического деформирования. Анализ информации, приведенной в технической литературе, показывает, что это устраняет указанные выше недостатки технологии и при определенных условиях создает значительно более износостойкую поверхность трения за счет создания на указанной поверхности упрочненного поверхностного слоя и формирования регулярного маслосдерживающего рельефа.

Следует также заметить, что известен способ формирования регулярного рельефа на плоских кольцевых поверхностях пластическим деформированием, который характеризуется перемещением деформирующего элемента по циклоидальной кривой. Перемещение изделия при этом осуществляется с постоянной скоростью радиальной подачи и переменной скоростью круговой подачи [1]. В результате формируется регулярный маслосдерживающий рельеф в виде пересекающихся деформационных рисок. Точки пересечения рисок расположены по архимедовой спирали, которая одновременно является направляющей для подвижной CENTROИДЫ (рис.1). Недостатком этого способа является сложность кинематики. В частности, для обеспечения переменной круговой подачи используются вариаторы, недостатки которых общеизвестны.

На кафедре технологии машиностроения Одесского национального политехнического университета разработан способ формирования регулярного рельефа на плоских кольцевых поверхностях с упрощенной кинематикой и расширенными технологическими возможностями. Сутью способа является осуществление процесса пластификации за счет перемещения деформирующих элементов по эпи-, или гипотрахоидальным кривым. При определенных условиях применение разработанного способа, создает значительно более износостойкую поверхность трения, за счет двух, имеющих различную физическую природу, факторов: формирования программируемого регулярного маслосдерживающего рельефа в виде пересекающихся рисок и формирования упрочнен-

ного (наклепанного) поверхностного слоя.

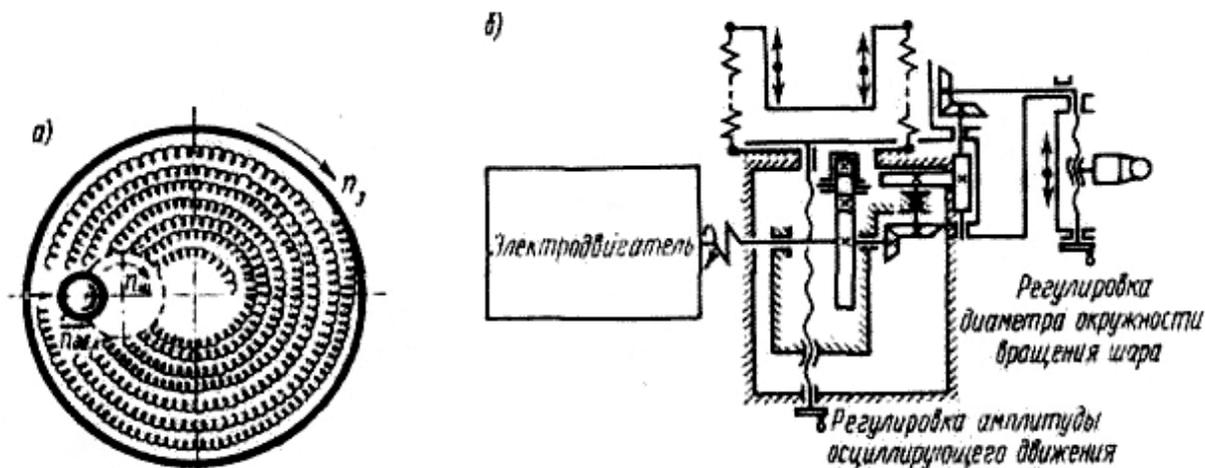


Рис. 1. Схема и приспособление для формирования регулярных рельефов на кольцевых поверхностях.

В настоящей работе представлен вывод математических зависимостей, описывающих разработанный способ. Указанные зависимости необходимы для анализа и оптимизации кинематических параметров способа, а, следовательно, и конструктивных параметров устройств для реализации способа.

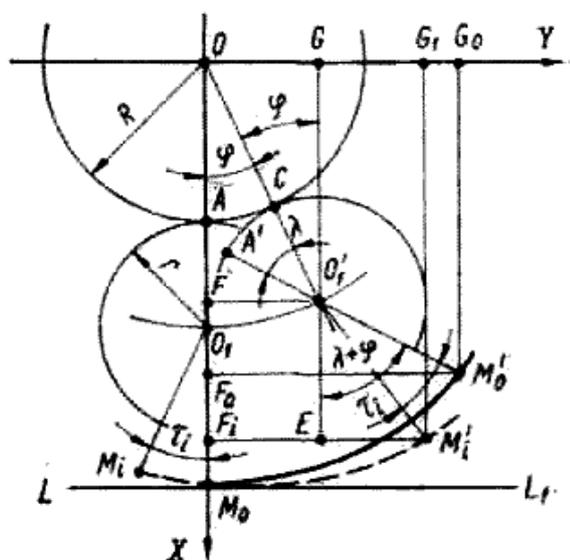


Рис. 2. Расчетная схема для определения траекторий перемещения деформирующих элементов: O — центр солнечного колеса; O_1 — центр сателлита; $O_1M_0 = O_1'M_0' = r_0$; $O_1'M_i' = r_i$.

$$y_n = r(1+m) \sin \varphi - r_n \sin(1+m)\varphi, \quad (1)$$

где $m = R/r$; φ — угол поворота шпинделя (води́ла сателлита), отсчитываемый от положительного направления оси X .

Следует заметить, что формирование рельефа возможно несколькими деформирующими элементами, каждый из которых перемещается по собственной кривой. При этом возможно осуществление пластического деформирования на любом из участков трохоидальных кривых. В связи с этим, исходя из геометри-

Для реализации способа применяется инструмент, выполненный в виде планетарной накатной головки. При планетарной обработке, как правило, в качестве привода деформирующих элементов накатной головки используется планетарный зубчатый механизм с неподвижным солнечным колесом [2, 3]. Качение без скольжения начальных окружностей сателлитов, радиусом r , по начальной окружности $x^2 + y^2 = R^2$ солнечного колеса, обуславливает перемещение вершины деформирующего элемента, отстоящего от оси сателлита на расстоянии r_n , по эпициклоидальной кривой, уравнения которой в параметрической форме имеют следующий вид [4]:

$$x_n = r(1+m) \cos \varphi - r_n \cos(1+m)\varphi,$$

ческих построений рис.2, запишем уравнения (1) в видоизмененной форме для i -го деформирующего элемента

Из рис. 2 следует, что когда шпиндель повернется на угол φ , то вершина деформирующего элемента переместится из точки M_0 в M'_0 . Необходимо определить геометрическое место точек M в координатах X и Y из условия качения без скольжения начальных окружностей солнечного колеса и сателлита ($AC = A'C$):

$$\begin{aligned} x_0 &= OF + FF_0 = (R + r) \cos \varphi + r_0 \cos(\lambda + \varphi); \\ y_0 &= OG + GG_0 = (R + r) \sin \varphi + r_0 \sin(\lambda + \varphi). \end{aligned} \quad (2)$$

Так как $AC = R\varphi$, $A'C = r\lambda$, то $\lambda = R\varphi/r$.

Подставляя выражение (3) и $m = R/r$ в (2), получено

$$\begin{aligned} x_0 &= r(1 + m) \cos \varphi - r_0 \cos(1 + m)\varphi; \\ y_0 &= r(1 + m) \sin \varphi - r_0 \sin(1 + m)\varphi. \end{aligned} \quad (3)$$

С учетом круговой подачи $S_{кр}$:

$$\begin{aligned} x_0 &= r(1 + m) \cos(\varphi \pm \varphi_1) - r_0 \cos((1 + m)\varphi \pm \varphi_1); \\ y_0 &= r(1 + m) \sin(\varphi \pm \varphi_1) - r_0 \sin((1 + m)\varphi \pm \varphi_1), \end{aligned}$$

где φ_1 – угол поворота изделия вокруг собственной оси за время одного орбитального поворота деформирующих элементов.

С учетом того, что $\varphi = \omega t$ и $\varphi_1 = \omega_1 t$, имеем

$$\begin{aligned} x_0 &= r(1 + m) \cos((\omega \pm \omega_1) \cdot t) - r_0 \cos(((1 + m)\omega \pm \omega_1) \cdot t); \\ y_0 &= r(1 + m) \sin((\omega \pm \omega_1) \cdot t) - r_0 \sin(((1 + m)\omega \pm \omega_1) \cdot t), \end{aligned} \quad (4)$$

где ω – угловая скорость шпинделя; ω_1 – угловая скорость изделия; знак « \pm » учитывает направление круговой подачи изделия.

В уравнениях (4) принято условие совпадения исходного положения точки M_0 с осью X . Для произвольного же i -го деформирующего элемента это условие не соблюдено. Однако, если ввести фиксированные в системе координат сателлита радиальную r_i и угловую τ_i координаты i -го элемента (рис.2, точка M_i), приняв полярную ось совпадающей в исходном положении с осью X , то получим уравнение для i -го деформирующего элемента в виде

$$\begin{aligned} x_i &= r(1 + m) \cos((\omega \pm \omega_1) \cdot t) - r_i \cos [((1 + m)\omega \pm \omega_1) \cdot t - \tau_i]; \\ y_i &= r(1 + m) \sin((\omega \pm \omega_1) \cdot t) - r_i \sin [((1 + m)\omega \pm \omega_1) \cdot t - \tau_i]. \end{aligned} \quad (5)$$

Варьируя видом кривых и параметрами этих кривых $R, r, m, r_i, \tau_i, \omega_1$ – можно получить бесчисленное множество вариантов сетки следов деформации на кольцевой плоской поверхности.

В связи с этим представляет интерес исследование уравнений (4), (5) для отбора кривых с соответствующими значениями указанных параметров, удовлетворяющих требованиям технологии (расстояние между соседними кривыми, углы пересечения следов деформирующих элементов, векторы деформирующих сил, параметры планетарного привода и т.д.) для формирования упрочненного слоя и маслоудерживающего рельефа.

Литература: 1. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984. – 831 с. 2. Родин П.Р. Основы формообразования поверхностей резанием. – К.: Вища шк., 1977. – 192 с.

ПАРАМЕТРИЧНІ КОЛИВАННЯ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ ДЕТАЛЕЙ

Оргіян О.А., докт. техн. наук, **Бажанов О.І.**, **Бензар А.М.** (м. Одеса, Україна)

We study the sources of parametric oscillation finishing boring mill-kov, and given their classification.

В металоріжучих станках, окрім притаманним машинам загального призначення змінності жорсткості, інерційних характеристик і демпфірування, можна знайти ряд специфічних джерел не стаціонарності [1, 2]. Особливості параметричного збудження коливань попередньо знаходяться нарахуванням зворотних зв'язків в динамічній системі, і саме тому розрізняти параметричні взаємодії перш за все необхідно по належності їх елементам замкнутої системи. Ціль роботи – вивчення

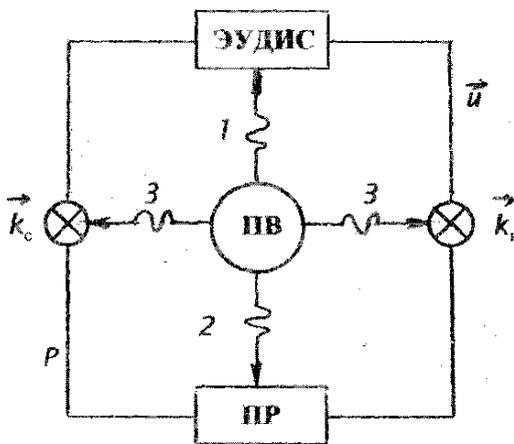


Рис. 1. Типи параметричного збудження у динамічній системі СПД.

джерел параметричних коливань розточувальних верстатів і проведення їх класифікації.

Модель динамічної системи будемо розглядати в вигляді , що відповідає технологічним задачам, тобто поєднання в ЕУДІС відповідну пружно-деформаційну інерційну систему в її взаємодії з процесами в двигунах і пристроях автоматичного регулювання, а також і з процесом тертя. При цьому виділяється лиш контур зв'язку ЕУДІС з процесом різання (ПР), включаючи проектуючі коефіцієнти κ_c і κ_k , які являються n -мірними векторами (n – кількість степенів свободи ЕУДІС).

Як показано на структурній схемі (рис. 1), за ознакою належності елементам динамічної системи параметричного збудження можна віднести до одного із трьох типів:

- 1) збудження параметрів ЕУДІС в наслідок змінності приведенної ваги, або жорсткості елементів системи;
- 2) збудження параметрів ПР в наслідок неоднорідності матеріалу деталі, що обробляється, похибки пристроїв, переривчастості поверхні, що обробляється, а також змінності швидкості різання і подачі;
- 3) збудження проектуючих коефіцієнтів внаслідок зміни напрямів і точок прикладання сил різання.

Наведена класифікація параметричної взаємодії за ознакою належності елементам динамічної системи дуже важлива, в першу чергу, для розробки розрахункової схеми системи. Розглядаючи різні джерела параметричного збудження коливань (рис.2), можна встановити, що їх відношення до певного типу залежить не тільки від природи збурювання параметрів, а і від характеристик, що впливають на вибір розрахункової схеми. Так змінність напряму $\varphi(t)$ сили різання при розточуванні збуджує коливання по типу 1, якщо технологічна піддатливість системи визначається в основному шпинделем з інструментом і змінюється при обертанні, допускаючи модель УДІС з одною ступенню свободи і

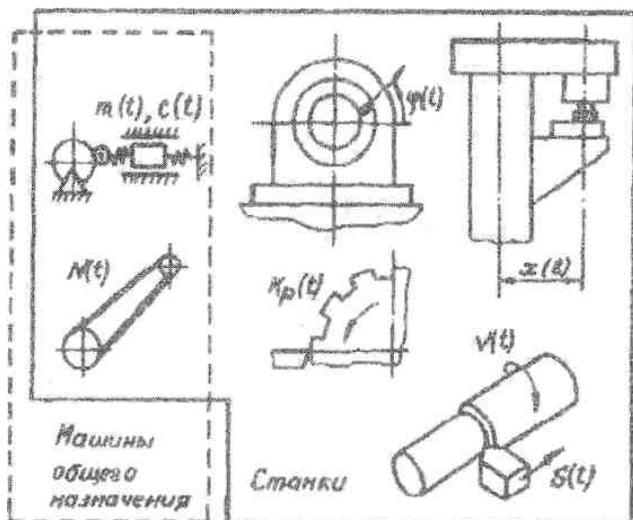


Рис. 2. Приклади джерел параметричного збудження динамічної системи СПД.

ності передаточних функцій механізмів систем приводу робочих і допоміжних рухів, що зароджують залежність від часу наведених значень інерційних характеристик $m(t)$ і жорсткості $c(t)$. Аналогічно на параметри ЕУДІС можуть впливати змінність зусиль $N(t)$ і зусиль контакту в ременевих і зубчастих передачах, а також не стаціонарність характеристик систем автоматичного управління.

Впливи на параметри ПР особливо видні при обробці деталей з чавуну та інших не однорідних матеріалів, а також при змінному припуску на обробку, що викликаний похибкою попередньої технологічної операції і не точністю базування деталі. Обробка переривчастої поверхні супроводжується параметричними і силовими діями високої інтенсивності.

Змінність перерізу шару що зрізується призводить до залежності від часу коефіцієнта різання $k_p(t)$. Змінність шару що зрізується також може бути викликана зміною швидкостей головного руху $v(t)$ і подачі $s(t)$. При розробці розрахункової моделі системи корисно також відрізнити параметричні дії за кінематичною характеристикою руху робочих органів, що викликає змінність параметри. Збудження що залежать від лінійних і кутових переміщень, будемо називати відповідно, позиційними і орієнтаційними, а ті що залежать від зміни швидкості – швидкісними.

Вибір розрахункового методу і розробка методики експериментального дослідження багато в чому залежить від часової форми дії на динамічну схему. Класифікація за цією ознакою відповідає прийнятому в загальній теорії коливань розділенню процесів на детермінуючі (аперіодичні, гармонічні і полігармонійні) і випадкові (вузько і широко смужні). Аперіодичні зміни параметрів виникають, наприклад, при поступовому русі робочих органів станка, а також при зміні температури елементів системи СПД, що не розглядаються в даній статті. Зміна напряму сили різання по відношенню до елементів УДІС станка при обертанні інструменту, або заготовки, викликає гармонічну дію на параметри системи. Зміна параметрів механізмів і залежність від часу коефіцієнтів різання при обробці переривчастих поверхонь частіше описується полігармонійними функціями. Вузько смужові випадкові зміни параметрів виникають через похибки форми елементів підшипників кочення, а також в ременевих і зубчастих пе-

змінною жорсткістю. Якщо ж помітний вклад в піддатливість вносить і деталь з влаштуванням, що приводить до моделі УДІС де степенів свободи декілька, тоді обертання сили різання разом з різцем збуджує коливання по типу 3. В залежності від співвідношення параметрів рухомої бабки і консольного столу переміщення $x(t)$ подачі при фрезеруванні породжує збудження типу 1, типу 3, або обох типів.

Збудження параметрів ЕУДІС виникають також в наслідок змін-

редачах. Не однорідність матеріалу, що оброблюється, являється джерелом широко смугових випадкових збуджень параметрів процесу різання.

Будемо розрізняти також параметричні дії по їх впливу на стійкість динамічної системи. Зміна параметрів може бути викликана не тільки втратою стійкості, що проявляється в збудженні коливань в зонах параметричних резонансів, а і підвищення стійкості, подібно до ефекту Челомея. Відповідно, параметричні взаємодії будемо називати дестабілізуючими, або стабілізуючими. Слід при цьому відмітити, що дія постійної складової сили різання призводить до виникнення коливань і в зонах параметричної стійкості, якщо змінними є параметри системи, що описують її статичні характеристики: жорсткість, коефіцієнт різання, і проектуючі коефіцієнти.

Таблица 1

Класифікація параметричних впливів на систему

Ознаки ,за якими класифікуються параметричні впливи	Типи впливів	Призначення класифікації
Елемент динамічної системи що зазнає впливу	– ЕУДІС – процес різання – проектуючі коефіцієнти	Розробка розрахункової схеми
Кінематична характеристика збуджень, що причинає рух робочих органів верстату	– позиційні – орієнтаційні – швидкісні	
Тимчасова форма	– аперіодична – полігармонійна – випадкова – широко смужна	Розробка методів експерименту і розрахунку
Вплив на сталість динамічної системи	– стабілізуюче – дестабілізуюче	Оцінка реакції на вплив і розрахунок надійності

Вплив параметричних дій на показники якості верстата визначаються просторовою формою і рівнем коливань, так як і кінематичними характеристиками аперіодичних пружних переміщень, що збуджуються в УДІС. Формулюючи цілі дослідів параметричних динамічних явищ в станках, корисно розрізняти процеси що зароджують похибки обробки. Підкреслимо, що в динаміці станків перевищуючим є вплив процесів на показники точності, в той час, як для машин загального призначення характерним є вплив на міцність. Дія обох типів, в кінцевому результаті, змінює надійність станка, як технологічної системи. Підрахунки класифікаційного аналізу параметричних впливів на систему верстата зведені в табл. 1. Таким чином в роботі вивчені джерела параметричних коливань розточувальних верстатів, а також надана їх класифікація.

Література: 1. Линчевский П.А., Джугурян Т.Г., Оргиян А.А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках. – К.: Техника, 2001. – 300 с. 2. Линчевский П.А., Оргиян А.А., Онищенко С.М. Тонкое растачивание отверстий с прерывистой поверхностью // Физические и компьютерные технологии. – Труды 12-й Международной научно-технической конференции, 7-8 июня 2006г. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2006. – С. 48-52.

**ДИНАМІКА ТОНКОГО РОЗТОЧУВАННЯ ОТВОРІВ З
ПЕРЕРИВЧАСТОЮ ПОВЕРХНЕЮ****Оргіян О.А., докт. техн. наук, Бажанов О.І., Бензар А.М.**

(м. Одеса, Україна)

To study the dynamics of fine boring holes with intermittent under-surface, and defined the conditions of intense vibrations

Переривчастість поверхонь, що обробляються, призводить до періодичного повторення процесів різання і виходу інструменту, порушуючи тим самим стаціонарність замкнутої динамічної системи верстата, викликаючи появу інтенсивних дій на процес різання [1,2]. Період цих дій задається входом і виходом ріжучих лез. Вони збуджують коливання верстата, рівень яких значно вищий, чим при обробці суцільних поверхонь в аналогічних умовах.

Розточування отворів з переривчастою поверхнею є достатньо розповсюдженою в машинному будівництві операцією, що виконується на оздоблювально-розточувальних, координатно-розточувальних і токарних станках. Деталі з переривчастою поверхнею обробки складають 12% від загальної кількості деталей, на які налагоджені оздоблювально-розточувальні верстати. До числа таких деталей відносять шатуни, кронштейни, кришки, блоки циліндрів, стакани підшипників, шліцові шестерні, гільзи циліндрів та інші, що входять в склад продукції машинобудівних заводів масового виробництва. Для розглянутих деталей кількість переривань поверхні, що обробляється за один оберт, змінюється від 1 до 20.

Колівання частоти збуджень в умовах переривчастого різання залежить від частоти і форми імпульсів. При наявності щилин в з'єднаннях елементів приводу динамічна система станка стає не лінійною. Режим праці, при якій щилини розкриваються, супроводжуються підвищеним шумом, зносом з'єднань і ріжучого інструменту, а тому такі режими є не допустимими. Метою роботи є вивчення динаміки тонкого розточування отворів з переривчастою поверхнею і визначення умов виникнення інтенсивних коливань.

Експериментальне дослідження коливань при тонкому розточуванні отворів з переривчастою поверхнею виконано на стенді СУ, зібраному в двох варіантах: з борштангою що обертається і що не обертається. Перша борштанга встановлювалась так, щоб сили різання P_y і P_z були зорієнтовані за напрямом головних осей жорсткості пружної системи. Основна серія дослідів проводилась при розточуванні отворів в зразках, виготовлених зі сталі 45 з числом однаково розташованих пазів $j=1$ в 6 і 20. Окремі досліді проводились на зразках з сірого чавуна СЧ 18, з титанового сплаву ВТ-5 і з бронзи ОЦС 6-6-3, на зразках $j=3, 4$ і 5, а також на зразках з пазами не однакової ширини. Співвідношення між шириною паза b_n і виступу b_e , що характеризується параметром форми збудження $g = b_n / (b_n + b_e)$ змінювалось в межах від $g=0,1$ до $g=0,5$. Середнє значення діаметру отвору складало 37 мм. Розточування сталевих зразків виконувалось борштангами діаметром 25 мм з $l_1 / d_1=3$ і 4 обладнаною рі-

зцями зі сплаву Т30К4 з наступною геометрією: $\varphi = 60^\circ$; $\varphi_1 = 10^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $\alpha_1 = 12^\circ$; $\gamma = -3^\circ$; $\lambda = 15^\circ$; $r = 0,1$ мм. Швидкість різання змінювалась від 100 до 200 м/хв з кроком 6 м/хв при постійній швидкості подачі 0,025 мм/об і двох значеннях глибини різання: 0,05 і 0,1 мм.

Основні закономірності розвитку коливань не змінюються при переході від розточування борштангою, що не обертається, і при зміні матеріалу зразка. Характер коливань зберігається і при переході до розточування зразків не однакової ширини. Розглянемо результати основної серії дослідів, виконаних з використанням борштанг.

Знайдені значення параметрів при $l_1 / d_1 = 3$ і 4: радіальна жорсткість у різця c , Н/мкм = 6 і 4; перша особиста частота f , Гц = 1100 і 750; логарифмічний декремент коливань $\sigma = 0,10$ і 0,09.

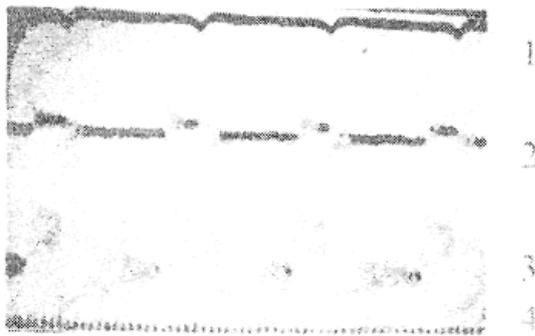


Рис.1. Коливання при розточуванні зразків з одним пазом: 1 – відмітки обертів; 2 – у-коливання; 3 – z-коливання; 4 – 500 Гц.

По осцилограмам процесу розточування зразків з одним пазом (рис.1) встановлено характер коливань: на фоні періодичних змін стану рівноваги в момент врізання різця збуджуються і високочастотні коливання.

Декремент коливань під час врізання відрізняється від виміряного при проходженні пазу і може бути виражений через параметри замкнутої динамічної системи. Наприклад, при $t = 0,05$ мм для борштанги $l_1 / d_1 = 3$: $\delta_{розрах} = 0,072$; $\delta_{експер} = 0,07$; для борш-

танги $l_1 / d_1 = 4$: $\delta_{розрах} = 0,047$; $\delta_{експер} = 0,04$.

Відмітимо, що безпосередньо після врізання коливання носять декрементний характер навіть при таких умовах обробки, які при розточуванні суцільних поверхонь призводять до збудження автоколивань. Це пояснюється синхронізацією ударних імпульсів при врізанні, завдяки якому коливання на двох наступних обертах стають майже синфазними, і механізм різання по сліду стабілізує замкнену динамічну систему.

Зі зростанням глибини різання збільшується зміщення положень рівноваги, а також зростають початкові значення амплітуд високочастотних коливань. Ця закономірність зберігається при обробці зразків з великим числом пазів, коли коливання мало змінюють свій рівень за час проходження виступу і пазу (рис. 2).

Для таких зразків на рівень коливань суттєво впливають значення їх фаз в момент входу і виходу різця, тому і значні зміни рівня коливань при варіюванні частоти обертання шпинделя. Результати експерименту представлені у вигляді залежностей амплітуд згинальних коливань борштанг від швидкості різання. На рис. 3 показана також шкала значень відношень власної частоти f_e збудження, що викликано процесами переривання різання.

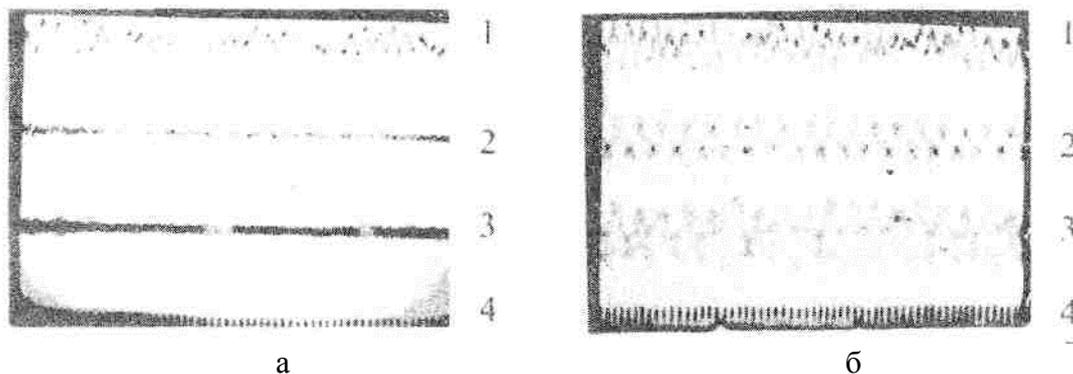


Рис. 2. Коливання при розточуванні суцільної і переривчастої поверхні борштангою з $l_1/d_1=3$; а – $j=0$; б – $j=6$; $g=0,5$; 1 – коливання корпусу головки; 2 – у-коливання; 3 – z-коливання; 4 – 500 Гц; 5 – відмітки обертів.

Малі значення f_1/f_0 відповідають обробці зразків з $j=20$, а великі – $j=6$. При малих значеннях співвідношення f_1/f_0 максимуми амплітуди досягають, коли f_1/f_0 кратне 0,5.

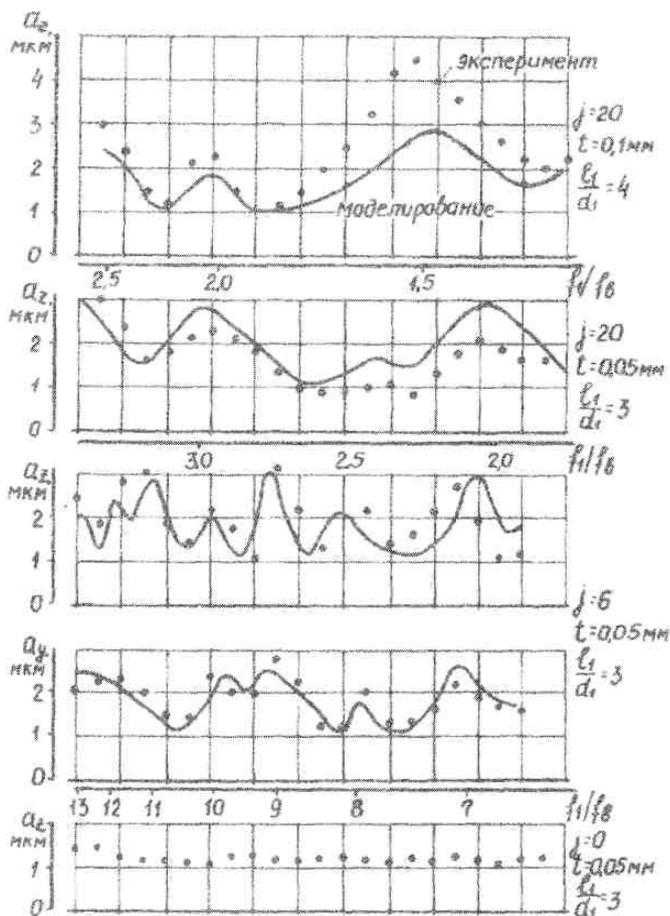


Рис. 3. Залежність амплітуди коливань від швидкості різання при розточуванні переривчастих і суцільних ($j=0$) поверхонь.

При великих значеннях цього співвідношення максимуми амплітуди досягають тільки при цілих його значеннях. Максимальне значення амплітуд коливань при розточуванні переривчастої поверхні в 2 – 4 рази більше, ніж при розточуванні суцільної поверхні, а мінімальне значення – таке ж, як і при відсутності переривчастості. В зоні великих значень f_1/f_0 спостерігається чергування інтенсивностей максимумів: при непарних значеннях f_1/f_0 амплітуда коливань більша ніж при парних. Рекомендації при виборі швидкості різання повинні враховувати результати розрахунків коливань, при цьому не виключено, що більш виробничі режими обробки можуть бути менш вібронезбезпечними.

Оскільки динаміка переривчастого різання залежить від співвідношення власної частоти

системи до частоти збудження, не монотонною може також бути залежність амплітуди коливань від жорсткості і ваги УДІС. Якщо управління швидкістю різання по будь-чому не раціональне, можна вивести динамічну систему з небезпечної резонансної області змінюючи власну частоту, наприклад, збільшити або

зменшити вагу вільного кінця консольної борштанги.

Експериментальні дані про коливання при обробці переривчастих поверхонь співставленні з результатами дослідження рішень системи рівнянь руху, при складанні якої УДІС розглядається як система з двома степенями свободи, що відповідають напрямам головних осей згинаючої піддатливості борштанги, а структурі динамічної системи періодично змінюється в моменти різання і виходу різця з паз:

$$\begin{aligned} m_1 d^2 z / dt^2 + r_1 dz / dt + c_1 z &= P_z \Phi(t) + Z(t), \\ m_2 d^2 y / dt^2 + r_2 dy / dt + c_2 y &= \mu P_z \Phi(t) + Y(t), \\ T_p dP_z / dt + P_z &= k_p (-y + a) \Phi(t). \end{aligned} \quad (2)$$

Тут $m_1, m_2; r_1, r_2; c_1, c_2$ – наведенні значення ваги коефіцієнтів демпфірування і жорсткості; Z, Y – задані зовнішні силові дії на УДІС; a – товщина шару, що зрізується; $\Phi(t)$ – функція періоду $T_g = (b_n + b_g) / V$; V – швидкість різання). При записі рівнянь руху прийнято, що складові сили різання пов'язані співвідношенням $P_y = \mu P_z$ і що тангенціальні зміщення верху різця, викликані пружними деформаціями і не змінюють тривалості різання і його переривання. Моделювання рівнянь на АВМ призводить до результатів які не згоджуються з експериментальними даними по положенню і інтенсивності максимумів амплітуди коливань. Розходження з експериментом збільшується в зоні малих значень f_1 / f_g .

Моделювання показує, що прийнятий вид функції $\Phi(t)$ зовсім не рівносильний допустимості про дію на ПС прямокутних імпульсів. Запис змінної P_z дозволяє встановити нахил ділянок наростання і спадання сили різання, що залежить від значень параметрів динамічної системи. Досліди рішень на моделі призводять до висновку про слабкий вплив швидкісної залежності сили різання, що залежить від значень параметрів динамічної системи.

Література: 1. Линчевский П.А., Джугурян Т.Г., Оргиян А.А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках. – К.: Техника, 2001. – 300 с. 2. Линчевский П.А., Оргиян А.А., Онищенко С.М. Тонкое растачивание отверстий с прерывистой поверхностью // Физические и компьютерные технологии. – Труды 12-й Международной научно-технической конференции, 7-8 июня 2006г. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2006. – С. 48-52.

УДК 621.922

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА

Кремнев Г.П., канд. техн. наук, **Наддачин В.Б.**, канд. техн. наук
(г. Одесса, Украина)

Justifiable conditions improve drilling holes of small diameter.

Повышение стойкости сверл при обработке отверстий малых диаметров является важной технико-экономической проблемой. До полного затупления длина обработки отверстий сверлами малого диаметра составляет в зависимости от марки материала всего лишь 10...15 мм. Для увеличения стойкости

сверл, как известно, применяют смазочно-охлаждающие составы с высокой адгезионной способностью, хорошими смазывающими свойствами и высокой теплостойкостью. Но, в малое отверстие они проникают плохо, поэтому при обработке отверстий малого диаметра часто используется раствор олеиновой кислоты.

Применение раствора олеиновой кислоты позволяет увеличивать стойкость сверл между переточками, но оказывает вредное влияние на здоровье людей. При обработке отверстий происходит разбрызгивание раствора, что вызывает загрязнение рабочего места. Олеиновая кислота в несвязанном состоянии вызывает кожные заболевания рук, а продукты испарения оказывают вредное воздействие на дыхательные органы человека.

Для устранения этих недостатков на кафедре “Технологии машиностроения” Одесского национального политехнического университета были разработаны и исследованы карандаши твердой смазки (КТС) различных составов [1–3]:

- химически активные или коррозионно-активные, обладающие комплексом различных свойств и образующие новые соединения (сера, хлор, фосфор, теллур и др.);
- поверхностно активные, обладающие как смазочным действием, так и адсорбирующим эффектом (содержащие карбоновые кислоты, например, стеариновую, жиры, воски, мыла и др.).

Карандаш твердой смазки представляет собой цилиндр диаметром 16 мм и длиной 50 мм. Карандаш является твердым раствором входящих в него компонентов на основе стеарина. Стеарин играет положительную роль как смазывающего, так и охлаждающего вещества. При содержании стеарина более 80% эффективность положительного воздействия твердой смазки уменьшается. Стеарин наряду с хорошими смазывающими свойствами, имеет низкую адгезионную способность, поэтому эффективность воздействия стеарина как твердой смазки уменьшается при форсировании режимов резания. Уменьшение количества стеарина до 75% и ниже изменяет консистенцию состава, ухудшает затвердевание расплава карандашей твердой смазки.

Олеиновая кислота оказывает смазывающее и охлаждающее действие. В предлагаемых составах количество олеиновой кислоты более 18% нежелательно, так как приводит к изменению консистенций составов, худшему затвердеванию при отливке в формы, уменьшение ее процентного содержания до 12% и ниже ухудшает эффективность действия смазки при сверлении. Олеиновая кислота, находящаяся в связанном состоянии, не оказывает вредного воздействия на организм человека.

Соляровое масло и солидол повышают смачиваемость, адгезионную способность и имеют антикоррозионные свойства.

Карандаши твердой смазки также включают в себя разные добавки, которые уменьшают коэффициент трения во время обработки и оказывают полирующее действие.

В ходе исследований, которые проводились для карандашей твердой смазки: КТС №1, КТС №2, КТС №3, велась обработка отверстий сверлами из

Р6М5, в деталях из высокоуглеродистой хромистой подшипниковой стали марки ШХ15 (сравнивалось сверление с КТС и раствором олеиновой кислоты) и коррозионно-стойкой стали марки Х18Н9Т (сверление с КТС и в сухую). В процессе сверления карандаш твердой смазки периодически прижимался к режущему инструменту. На рис. 1 представлены диаграммы зависимости износа сверл от пройденного пути.

Исследования показали, что при использовании стали марки ШХ15, меньший износ по вершине и по задней поверхности оказался у сверл, для которых в качестве смазки использовали КТС №1 и КТС №2, а для Х18Н9Т - КТС №2, КТС №3.

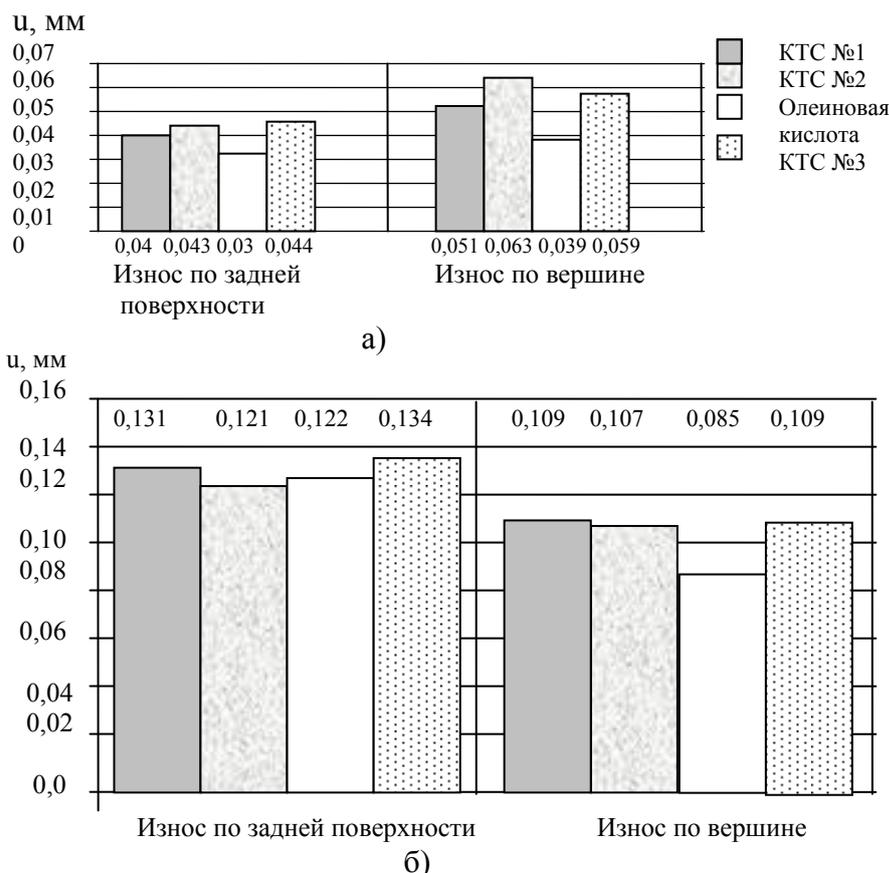


Рис.1. Зависимость износа от пройденного пути: а) сталь марки ШХ15; б) сталь марки Х18Н9Т.

Использование карандашей твердой смазки способствует уменьшению износа сверла и не влияет на здоровье рабочего.

Указанные составы КТС №1,2,3 можно применять как на операциях лезвийной, так и абразивной обработки, например, заточки тех же сверл.

Литература: 1. Кремнев Г.П., Наддачин В.Б., Якимов А.В., Винникова В.И., Яровой Ю.В. Новые составы твердых смазок для лезвийной и абразивной обработки труднообрабатываемых материалов // Вісник інженерної академії України. – Київ, №3 (частина 1), 2001. – С. 351-353. 2. Наддачин В.Б., Марчук В.И. Взаимосвязь температуры и вибраций при шлифовании кругами с прерывистой рабочей поверхностью // Труды 14-й Международной научно-технической конференции. Физические и компьютерные технологии. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2008. – С. 171-174. 3. Ларшин В.П., Гречиха А.А. О механизме действия твердых технологических смазок на силы резания при шлифовании // Вісник інженерної академії України. – Київ, спеціальний випуск, 2000. – С. 215-218.

**ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ І ПРОДУКТИВНОСТІ
ОБРОБКИ РІЗЬБОВИХ ОТВОРІВ**

Наддачин В.Б., канд. техн. наук, **Боркун А.І.**, **Занора В.О.**, **Капітан Р.Б.**
(м. Одеса, м. Черкаси, Україна)

Justifiable conditions for improving the accuracy and processing performance of threaded holes.

Сучасна технологія розвивається по таким основним напрямкам: створення нових матеріалів; розробка нових технологічних принципів, методів, процесів, устаткування; механізація й автоматизація технологічних процесів, що усуває особисту участь у них людини [1]. Особлива увага приділяється методам обробки різьбових поверхонь та їх сполучень, які забезпечують високі вимоги до якості різьбових з'єднань, наприклад, плавність обертання, точність переміщення, і вимагають впровадження більш продуктивних методів обробки, що обумовлено масовістю різьбових деталей, використовуваних в різних галузях промисловості. Майже всі сучасні вироби машинобудівного виробництва містять у собі відповідальні різьбові отвори, умови роботи яких вимагають забезпечення високої точності й підвищення механічних властивостей різьблення. Традиційні методи обробки таких отворів не завжди забезпечують високу точність й надійність різьблення і тому потрібно використовувати нові більш прогресивні методи. На даний час для обробки різьбових отворів широке використання отримують мітчики з поліпшеними технічними характеристиками.

Мітчики з ділянками, що вигладжують зуби [2]. Мітчики з відношенням ширини пера до кроку різьблення $F/P \geq 4$, застосовуються в основному для виготовлення різьблень із дрібними кроками та можуть бути виконані з двома ділянками, що вигладжують зуби. У такого мітчика на кожному зубі по ширині пера слідом за ділянками, що різуть, розташовуються дві що вигладжують (пластично деформуючих).

Завдяки тому, що забірний конус мітчика затилований по зовнішньому діаметру, при роботі мітчика слідом за ділянками зубів, що різуть, у контакт з оброблюваним різьбленням, починаючи з її заходу, вступають виступи першої ділянки, що вигладжує. Перша ділянка, що вигладжує, вступає в роботу ще до формування половини висоти різьблення, що значно підвищує точність обробки на перших нитках різьблення отвору. Виступи другої ділянки, що вигладжує, вступають у контакт з оброблюваним різьбленням слідом за виступами першої ділянки, що вигладжує, і закінчують формування профілю різьблення. Одночасно підвищується надійність базування мітчика в отворі, що дозволяє без зниження точності обробки підняти виконавчі розміри інструмента і завдяки цьому значно збільшити припуск на його знос. На частині мітчика, що калібрує, з різьбленням отвору контактують лише виступи другої ділянки, що вигладжує. При зносі вершин другої ділянки, що вигладжує, до ширини вершин першої ділянки, що вигладжує, останній вступає в роботу і на частині, що калібрує.

Перевагами таких мітчиків є досягнення необхідної точності різьбонарізання з перших ниток різьблення отворів і збільшення розмірної стійкості ін-

струмента; трудомісткість виготовлення нових мітчиків така ж, як мітчиків із профілем зубів, затилованим до гостра; їхня розмірна стійкість збільшується в 3 рази. Для отримання різьблення на мітчиках розроблені затиловані кулачки до різьбошліфувальних верстатів мод. 5820, 5821, 5822, 5822М. Мітчики рекомендуються для виготовлення різьблень у широкому діапазоні допусків, від посадок з натягом 2Н до ковзних 7Н. Недоліком є можливість налипання оброблюваного матеріалу по профілю зубів мітчика. Щоб уникнути цього бажано застосовувати змащувальні СОЖ (сульфофрезол, ОСМ-3, МР-1 і ін.).

Шахматні мітчики [3]. Шахматні мітчики призначені для нарізування різьблень діаметром від 2 до 36 мм на заготовках із корозійностійких і жароміцних сталей та легких сплавів. Недоліками звичайних шахматних мітчиків з парним числом лез є різна товщина зрізів на зубах лез і як наслідок, не однакове зношення. Для підвищення працездатності шахматних мітчиків пропонується зуби забірної частини на двох протилежних лезах знижувати по зовнішньому діаметру на величину a_z , рівну товщині зрізу (див. рис. 1) (а. с. 1041244):

$$a_z = \frac{P}{z} \cdot \sin \varphi$$

де P - шаг різьби, z - число лез, φ - кут забірної частини мітчика.

Це дозволяє вирівняти зрізи по товщині до $2a_z$ на зубах всіх лез мітчиків.

Пропонується конструкція мітчиків з парним числом лез, в якій знижують по зовнішньому діаметру зуби на забірній частині трьох лез, починаючи з першого леза з виразними нитками, рахуючи по лінії підйому різьби (а. с. 1148735). Величину e заниження зубів визначають в перерізі, нормальному до утворюючої забірної частини мітчика, по формулі:

$$e = \frac{(z - n) \cdot P \cdot \sin \varphi}{z},$$

де n - порядковий номер леза мітчика, починаючи з першого з вирізаними нитками рахуючи по лінії підйому різьби.

Перевагами нових мітчиків є те, що вони дозволяють підвищити точність нарізаних різьб, їхня стійкість підвищується до двох разів, а процес різання проходить більш спокійно.

Недоліком є трудомісткість їх виготовлення.

Мітчики для точних різьб у малопластичних матеріалах [4]. Проблема отримання точних різьблень у широкому діапазоні діаметрів і

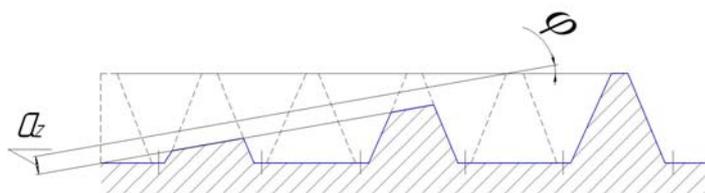


Рис. 1. Схема робочої частини шахматного мітчика.

кроків у кольорових металах і сплавах, ковких чавунах, високопластичних сталях успішно розв'язується на Брянському автомобільному заводі застосуванням безстружкових посиленних мітчиків (а. с. 782940, 997933, 1036483 і ін.). Для отримання точних різьблень у малопластичних матеріалах використовуються мітчики, що ріжучо – вигладжують. Кожне перо мітчика має ріжучі і вигладжуючі ділянки. Профіль поперечного перерізу мітчика виходить на операції

різьбошліфування від спеціального кулачка затилування (конструкція мітчиків, кулачків для їхнього виготовлення на операції різьбошліфування, виконавчі розміри приведені в збірнику галузевих стандартів ГОСТ 37.002.0992 – 83 – ОСТ 37.002.0994 – 83 «Мітчики з зубами, що ріжучо – вигладжують, для точних різьблень»).

Наявність ділянок, що вигладжують, на кожному зубі всіх пер мітчика забезпечує правильний напрямок зубів по гвинтовій лінії оброблюваного різьблення, що дозволяє одержувати точні різьблення в матеріалах, у яких одержання різьблень безстружковими посиленими мітчиками практично неможливо через їхню малу пластичність. Крім того, наявність ділянок, що вигладжують, забезпечує більш низьку шорсткість профілю різьблення в порівнянні з традиційним різьбонарізанням.

Перевагами цих мітчиків є те, що їх запровадження дозволило цілком ліквідувати «провали» різьблень по середньому діаметрі, що мали місце при її калібруванні мітчиками, що ріжуть, на тонкостінних деталях типу патрубків; вони дозволяють стабільно одержувати якісне різьблення ступеня точності 6Н і поля допуску 3Н – 6Н в деталях з магнієвого сплаву МЛ-5. Однак необхідно відзначити, що недоліком таких мітчиків є складність їх виготовлення та необхідність застосування спеціальних кулачків, для затилування цих мітчиків. Також високі вимоги пред'являються при виготовленні партії мітчиків до розташування пер між собою (різноперість).

Безстружкові мітчики [5]. Для отримання внутрішніх різьб в деталях з кольорових металів і сплавів, ковких чавунів, високопластичних сталей широке використання знаходить метод холодної пластичної деформації за допомогою безстружкових мітчиків. При цьому забезпечується високий ступінь точності різьбового отвору, а саме 4Н, 5Н, 6Н і т.д. Шорсткість профілю різьблення $Ra = 0,4 \dots 1,6$ мкм. Довжина оброблюваних різьбових отворі різна – від 1...2 витків різьблення до 3...5 діаметрів отвору. При отриманні коротких різьб в деталях типу панелей радіо і електроапаратури практично не спостерігається зривів витків різьблення.

При виготовленні безстружкових мітчиків використовується те ж устаткування, майже та ж технологія, що і для ріжучих мітчиків. Виключаються операції фрезерування стружкових канавок, затилування забірної конуса і заточування пер до передньої грані. Основні відмінності полягають у виконанні операції різьбошліфування, на якій для виготовлення безстружкових мітчиків потрібні спеціальні копірні лінійки для профілізації забірної частини мітчиків. При експлуатації безстружкових мітчиків використовуються ті ж верстати і пристосування, що і для роботи ріжучих мітчиків. Залишаються незмінними і режими обробки, в окремих випадках вони можуть бути підвищені до 30%. Відмінності в отриманні різьб безстружковими мітчиками полягають тільки в діаметрах отворів під різьблення. Для безстружкових мітчиків діаметри отворів під різьблення повинні бути дещо більше, ніж під ріжучі мітчики. Отвори можуть бути одержані свердлінням по кондукторних втулках, штампуванням, точним литвом і т.д.

Для ПО «Брянський автомобільний завод» розроблений ряд конструкцій

безстружкових мітчиків (а. с. 782940, 997933, 1028455, 1036483). Перевагами цих мітчиків є одержання різьблення від М4 до М52 з кроком від 0,7 до 2 мм на універсальних, агрегатних верстатах, верстатах з ЧПУ, оброблювальних центрах. Розроблені мітчики мають зусилля поперечного перетину різьбової частини, що дозволяє одним і тим же інструментом одержувати різьблення в сплавах кольорових металів, в сталях та ковких чавунах.

Кориговані мітчики [6]. Умови роботи мітчиків при нарізанні різьблення в деталях з високоміцних, жароміцних і титанових сплавів вельми утруднені. В роботі одночасно бере участь велика кількість зубів; інструмент контактує з деталлю не тільки в зоні різання, але і неробочими бічними поверхнями; окремі ріжучі зуби і весь мітчик недостатньо міцні, особливо при нарізанні різьб з малим діаметром і кроком; доступ СОЖ в зону різання утруднений і т.д. Зростають момент і робота тертя, що викликає підвищення температури різання і інтенсивний знос мітчика. Крім того завдяки пружній післядії витків різьблення (особливо при обробці титанових сплавів мають модуль пружності) виникають значні нормальні сили, що приводять до затискання зубів мітчиків в западинах різьблення і значного зростання моменту тертя. В результаті при нарізанні різьблення мітчиками в жароміцних і титанових сплавах виникають інтенсивні вібрації, що приводять до сколів окремих зубів і поломці мітчиків.

Аналіз динаміки процесу показав, що в основному автоколивання виникають через «падаючу» характеристику моменту різьбонарізання від швидкості, нелінійною залежністю моменту тертя від швидкості. Зменшення площі тертя між оброблюваним матеріалом і зубами мітчика понизить момент тертя і понизить інтенсивність автоколивань інструменту. На підставі цього розроблені кориговані мітчики з високою корекцією (а. с. 1222443), упроваджені на ленінградському заводі «Більшовик».

Зменшення площі контакту інструменту із заготовкою досягають заниженням бічних сторін зубів забірної конуса і першого калібруючого зуба додатковим кутом 30° . Ширина першої западини визначається по формулі (див. рис. 2):

$$a_1 = \left(\frac{d - d_0}{2 \operatorname{tg} \varphi_3} - I_1 + P \right) \sin \varphi_3 \sin \frac{\alpha_n}{2} \cdot \left[\frac{1}{2 \cos\left(\frac{\alpha_n}{2} + \varphi_3\right)} + \frac{1}{2 \cos\left(\frac{\alpha_n}{2} - \varphi_3\right)} \right]$$

де I_1 - довжина забірної корпусу; P - крок різьблення; d , d_0 , - відповідно зовнішній і середній діаметри різьблення; α_n - кут профілю різьблення мітчиком; φ_3 - кут забірної конуса.

Кожна наступна западина більше попередньої на величину:

$$S_1 = \frac{P}{2} \sin \varphi_3 \sin \frac{\alpha_n}{2} \cdot \left[\frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha_n}{2} + \varphi_3\right)} + \frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha_n}{2} - \varphi_3\right)} \right].$$

Тут $\alpha_n = 60^\circ$ (для метричних різьб). При таких розмірах через послідовне збільшення западин зубів забірної частини і першого калібруючого зуба не передбачається тертя цих частин об оброблені поверхні витків різьблення,

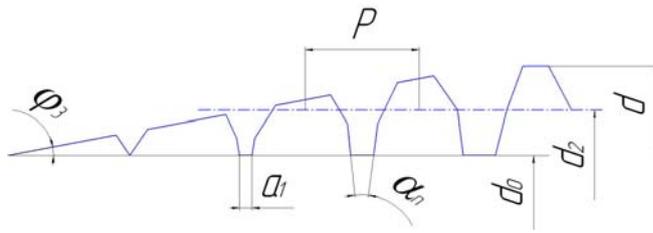


Рис. 2. Схема робочої частини коригованого мітчика.

поліпшується проникнення СОЖ в зону різання і навантаження рівномірно розподіляється між зубами. Збільшений об'єм западин виключає забивання мітчика стружкою. Знижується температура в зоні різання. Все це помітно знижує амплітуду крутильних

автоколивань. Вібрації, що виникають при обробці, негативно впливають на стійкість інструменту. Зменшення інтенсивності крутильних коливань при нарізанні різьб в важкооброблюваних матеріалах коригованими мітчиками забезпечує їх високу працездатність.

Переваги корегованих мітчиків полягають у наступному:

1. Їх стійкість приблизно вдвічі перевищує стійкість стандартних мітчиків. Швидкості різання при обробці жаростійких і жароміцних сталей, що рекомендується, в 1,5-1,8 рази вище, ніж при нарізанні різьб стандартними мітчиками. Можна використовувати один коригований мітчик замість комплекту з двох-трьох стандартних мітчиків. Кориговані мітчики можна застосовувати і при нарізанні різьб в глухих отворах.
2. Забезпечується стабільне отримання різьблення 4Н класу точності без додаткових похибок кута профілю різьблення. Точність різьблення вимірювали за допомогою спеціально розробленого оснащення і універсальним мікроскопом МІС-11.
3. Для виробництва коригованих мітчиків не потрібно спеціальних додаткових пристосувань і оснащення.

На основі проведеного аналізу мітчиків пропонуються такі рекомендації (див. табл. 1).

В табл. 1 діапазон швидкостей визначався для різьби М8×1 за допомогою формули [7, 297]:

$$V = \frac{C_V \cdot D^q}{T^m \cdot S^y} \cdot K_V,$$

де D – діаметр різьби; S – подача (у нашому випадку вона рівна кроку різьби); T – період стійкості інструмента; C_V , K_V , q , m , y – відповідно коефіцієнти та показники степеня, які залежать від виду оброблюваного матеріалу.

Проведений аналіз показує наступні переваги обробки різьбових отворів за допомогою розглянутих мітчиків порівняно з традиційними: можливість отримання точного різьблення у широкому діапазоні діаметрів і кроків у кольорових металах і сплавах, ковких чавунах та високо пластичних сталях; підвищення розмірної стійкості в 1,5–2 рази; підвищення точності нарізаних різьб; ліквідація «провалів» різьблень по середньому діаметрі; відсутність необхідності у використанні спеціальних додаткових пристосувань і оснащення для виготовлення таких мітчиків; збільшення швидкості різання приблизно в 1,5 рази.

Рекомендації по використанню сучасних мітчиків

Назва мітчика	Оброблюваний матеріал	Переваги	Недоліки	Діапазон швидкостей різання звичайних мітчиків	Діапазон Швидкостей різання розглянутих мітчиків
Мітчики з ділянками, що вигладжують зуби	Пластичні матеріали	1. Досягають необхідної точності різбонарізання з перших ниток різблення; 2. Збільшена розмірна стійкість інструмента; 3. Не висока трудомісткість виготовлення; 4. Виготовляють різблення у широкому діапазоні допусків	1. Можливість налипання оброблюваного матеріалу по профілю зубів мітчиків	1 – 2 м/хв	1,5 – 3 м/хв
Шахматні мітчики	Корозійностійкі і жароміцні сталі та легкі сплави	1. Підвищення точності нарізаних різб; 2. Збільшена розмірна стійкість інструмента; 3. Процес різання проходить більш спокійно	1. Висока трудомісткість виготовлення	2 – 4 м/хв	3 – 5 м/хв
Мітчики для точних різб	Кольорові метали і сплави, ковкі чавуни, високопластичні сталі	1. Ліквідують «провали» різблень по середньому діаметрі; 2. Виготовляють різблення у широкому діапазоні допусків	1. Складність їх виготовлення	1 – 4 м/хв	1,5 – 5 м/хв
Безстружкові мітчики	Кольорові метали і сплави, ковкі чавуни, високопластичні сталі	1. Дають можливість отримати різблення від М4 до М52; 2. Виготовляють різблення у широкому діапазоні допусків	1. Складність при виконанні операції різбошліфування	1 – 4 м/хв	1,5 – 5 м/хв
Кориговані мітчики	Високоміцні, жароміцні і титанові сплави	1. Збільшена розмірна стійкість інструмента; 2. Не висока трудомісткість виготовлення; 3. Виконують різблення без додаткових похибок кута профілю різблення	1. Необхідність у правильному розрахунку ширини першої та наступних западин мітчика	4 – 4,5 м/хв	5 – 6 м/хв

Застосування і впровадження сучасних прогресивних методів обробки у виробництво підвищує конкурентноздатність вітчизняних підприємств, продуктивність виробництва та якість продукції.

Література: 1. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. – М: Машиностроение, 2005. – 736 с. 2. Лопухов В.П. Метчики с выглаживающими участками на зубьях // Машиностроитель. – 1988. – №6. – С. 23-24. 3. Лопухов В.П. Шахматные метчики // Машиностроитель. – 1989. – №8. – С. 19. 4. Рикман С.Ф. Метчики для точных резб в малопластичных материалах // Машиностроитель. – 1990. – №11. – С. 17. 5. Рикман С.Ф. Безстружечные метчики // Машиностроитель. – 1988. – №7. – С. 23. 6. Гусейнов Р.В. Корригированные метчики // Машиностроитель. – 1988. – №2. – С. 16-17. 7. Справочник

УДК 515.2:518.62

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ВЕРСТАТНОГО
ЗАЧЕПЛЕННЯ СПРЯЖЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ЗАГОТОВКИ І
ІНСТРУМЕНТУ ПРИ ФІНІШНІЙ ОБРОБЦІ МЕТОДАМИ ВІЛЬНОГО
ОБКАТУ**

Умінський С.М., канд.техн.наук (м. Одеса, Україна)

Results of analytical and experimental researches of change of a corner of crossing of axes of the connected surfaces of preparation and the tool are given during processing cogwheels wheels by a tangential method sheving.

Подальше збільшення одиничних потужностей машин вимагає поліпшення всіх їх якісних показників, у тому числі міцності і точності. Технологічний процес виготовлення деталей з високою точністю і міцністю складається з ряду операцій. Досягти вказаних показників якості в такому складному процесі важко, оскільки при зміцненні (особливо термічному або хіміко-термічному) знижується точність, одержана на попередніх операціях, а при механічній обробці після зміцнення знімається найякісніший шар, виникають несприятливі залишкові напруги, тобто знижуються міцність і твердість робочих поверхонь деталі. При цьому технологічний процес порушується, неефективно використовуються металоріжучі верстати і інструменти і т.д. Підвищення ефективності таких технологічних процесів вимагає управління точністю виготовлення деталей на всіх виробничих стадіях. Цю задачу можна вирішити за допомогою оцінки можливих похибок розмірів і форми деталей щодо заданих допусків. Для цього необхідно провести аналіз і визначити відносний вплив конструкторсько-технологічних чинників на утворення геометричних похибок деталей. Впливаючи на чинники, що роблять істотний вплив на розсіяння погрешностей і величину їх середнього значення, можна визначити умови поставки початкового металу, вибрати елементи конструкції деталі, розробити технологію зміцнення і механічної обробки. Якість зубчатих коліс визначається їх міцністю і точністю. В більшості випадків міцність зубчатих коліс досягається шляхом термічного або хіміко-термічного зміцнення. Проте після таких операцій зміцнення значно зменшується другий показник якості — точність. При проектуванні конструкції і розробці технології виготовлення зубчатих коліс необхідно знати величину похибок, які можуть виникнути в процесі виготовлення цих деталей, тобто після механічної і термічної обробки [1].

Щонайвищу продуктивність обробки забезпечують способи шевінгування з подачею інструменту під кутом до осі заготовки /1/. В даний час в машинобудуванні набули поширення п'ять методів шевінгування зубчатих коліс – подовжнє, діагональне, тангенціальне, «короткого ходу» і врізне. Метод тангенціального шевінгування характеризується наявністю дотичної подачі, направленої перпендикулярно осі оброблюваного колеса. При такому методі обробки центр схрещування переміщується уздовж поверхні зуба шевера, в слідстві чого

знос ріжучих кромок відбувається рівномірно, стійкість інструменту підвищується. Значні зусилля, що виникають при обробці викликають пружні деформації елементів технологічної системи, величина деформацій елементів технологічної системи зменшується із збільшенням числа проходів [2].

В період урізування шевера в оброблювану заготовку величина припуску, що видаляється, максимальна, що приводить до збільшення плями контакту в процесі обробки. Далі за рахунок збільшення плями контакту, зусилля різання досягають своїх максимальних значень, і подальшого упровадження ріжучих зубців шевера в оброблювану заготовку не відбувається. В цей період шевер своїм ділильним циліндром перекочується по ділильному циліндру оброблюваної заготовки. На початку робочого ходу кут схрещування осей шевера і заготовки Σ' не рівний розрахунковому куту схрещування Σ (має місце перекус осей шевера і заготовки), а створююча ділильного циліндра шевера складає кут ΔV (непаралельність осей), тобто має місце комбінований перекус осей заготовки і інструменту [3]. Площини Π проведені через крапки контакту P_1 і P_3 ділильних циліндрів шевера і заготівлі на початку і кінці циклу обробки, і є дотичними до ділильного циліндра заготовки. Площини F проведені через осі шевера на початку і кінці обкату і через крапки P_1 і P_3 . Площини E_2 проведені через вісь заготовки і крапки контакту P_1 і P_3 . Площина E_1 проведена дотично до ділильних циліндрів шевера і заготовки при обробці в середнім положенні. Площина Q проведена через крапку контакту P_1 і P_3 паралельно площини E_1 . O_1O_1 – вісь заготовки; O_2O_2 – вісь шевера на початку циклу обробки; O_3O_3 – вісь шевера в середині циклу обробки; O_4O_4 – вісь шевера наприкінці циклу обробки. З побудов, приведених на мал.1 випливає, що найбільше відхилення осі шевера від розрахункового значення досягається на початку і кінці циклу обробки (P_1 і P_3). У середині циклу обробки (т. P_2) вісь шевера O_3O_3 практично не буде мати відхилень і залишається рівнобіжною площини Π . У цей період площини Π і E_1 збігаються [4]. Для визначення максимального кута непаралельності осей шевера і заготівлі необхідно спроектувати осі заготівлі й інструмента в момент початку обкату на площину E_1 (P_1K^1 і $P_1P_1^1$). Розрахункові залежності для визначення кута непаралельності осей, перекошу осей шевера і заготовки мають вигляд:

$$tg \Delta V = \sin \Sigma \sqrt{\frac{\Delta \alpha (2(r_0 \cos^2 \Sigma + r) - \cos^2 \Sigma)}{(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1)(1 + tg^2 \Sigma)(r_0 \cos^2 \Sigma + r - \Delta \alpha \cos^2 \Sigma)}}, \quad (1)$$

$$\sin \Sigma' = tg \Sigma \sqrt{\frac{(r_0 \cos^2 \Sigma + r) - \Delta \alpha \cos^2 \Sigma}{(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1)(1 + tg^2 \Sigma)}}, \quad (2)$$

де r_1 – радіус ділильного кола заготовки, мм; r_0 – радіус ділильного кола шевера, мм; $\Delta \alpha$ – зміна положення центру схрещування осей заготовки, і інструменту, мм.

Так, дослідження похибок виготовлення цементованих зубчатих коліс, різьбових і шліцьових деталей, муфт і зірочок показало, що величина похибки їх розмірів і форми більш ніж в 40% випадків залежить від технологічних чинників хіміко-термічної обробки, до 22% —от елементів конструкції, до 24% —

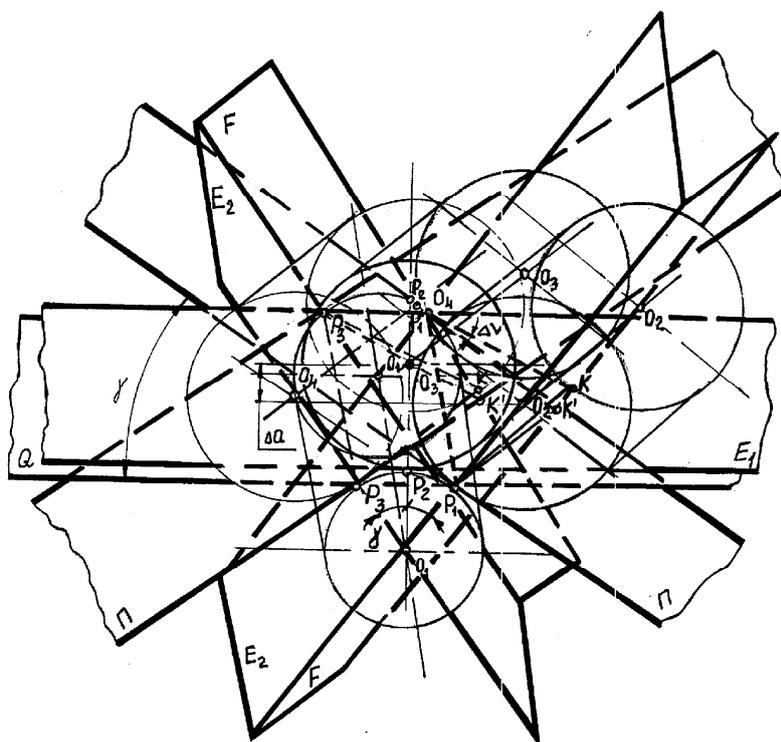


Рис.1.Зміна міжвісьової відстані при тангенціальному методі шевінгування.

от матеріалу і його полягання і близько 15% —от чинників механічної обробки. Для виключення впливу розмірного чинника всі похибки нами віднесені до одиниці довжини, тобто розрахована відносна похибка [5]. Похибки еталонного зубчатого колеса є початком відліку і служать основою для визначення умовної вірогідності того, що одержані результати на досліджуваних деталях відносяться до відповідного класу.

По теоремі Бейса умовна вірогідність

$$P_i' = \frac{P_i f_i(x)}{P_1 f_1(x) + P_i f_i(x)}, \quad (3)$$

де P_1, P_i – вірогідність появи похибок в заданому інтервалі біля еталонної деталі і досліджуваної; $f_1(x), f_i(x)$ – щільності вірогідності для еталонної і досліджуваної деталей.

Більшість похибок основних параметрів зубчатого колеса підкоряється нормальному закону розподілу. Тому вірогідність появи досліджуваної похибки відповідного параметра можна визначити по формулі Лапласа:

$$P_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi npq}} \exp\left[-\frac{(k-np)^2}{2npq}\right], \quad \text{або} \quad (4)$$

$$P_i = P^k q^{n-k} \frac{n}{k(n-k)}, \quad (5)$$

де n – число контрольних перевірок; k – число раз появи належної похибки з відповідними межами, рівними q ;

$$q = 1 - P, \quad (6)$$

P – вірогідність значень досліджуваної похибки в належному інтервалі

$$P = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{x_2} e^{-\frac{(x-x)^2}{2S^2}} dx, \quad (7)$$

або цей вираз можна записати за допомогою нормованої функції Лапласа, зна-

чення якої приводяться в літературі за математичною статистикою і довідниках [6, 7]:

$$P(x_1 < x < x_2) = \Phi(t_2) - \Phi(t_1) = \Phi(x_2 - \bar{X})/S - \Phi(x_1 - \bar{X})/S, \quad (8)$$

де x_1, x_2 – граничні значення досліджуваної похибки; \bar{X} – середня арифметична величина похибки; S – середня квадратична величина похибки.

Узагальнені координати – величини, що описують поведінку системи; їх число рівне числу ступенів свободи системи. Для деталей і їх моделей узагальненими координатами є зміна розмірів, форми, відносного положення їх поверхонь в процесі зміцнення. Це положення особливо важливо при моделюванні похибок деталей складних конструкцій з великим числом параметрів, що характеризують точність їх виготовлення. До таких деталей перш за все відносяться зубчаті колеса.

Найбільш чітко виявляються закономірності зміни розміру і форми зовнішньої поверхні зубчатого колеса, тобто діаметру вершин зубів da . Виявляється також функціональний зв'язок зміни діаметру вершин зубів і форми кола виступів з відношенням площ серцевини і зміцненого шару.

Результати аналітичних досліджень показують, що за критерій оцінки точності зубчатих коліс можна прийняти похибки розмірів і форми кола вершин зубів. Оскільки із зміною кола вершин зубів відбувається і зміна решти параметрів, то з'являється можливість одержати відповідні залежності і розрахункові формули [7].

Направлені зміни діаметру зубчатого вінця приводять до зміни кута нахилу зуба β , тобто до певної похибки напрямку зуба F_β . Величину похибки напрямку зуба можна визначити залежно від зміни розмірів зубчатого вінця:

$$F_{\beta_{r_1}} = \frac{\pi \Delta db}{\pi d \operatorname{ctg} \beta} = \frac{\Delta db}{d \operatorname{ctg} \beta} = \varepsilon_{pi} \frac{b}{\operatorname{ctg} \beta} = \varepsilon_{pi} b \operatorname{tg} \beta. \quad (9)$$

Проте по ГОСТ 1643–81 похибки напрямку зуба задаються залежно від ширини зубчатого вінця. Тому при одному модулі і ширині зубчатого вінця, але різних числах зубів зубчаті колеса після термічної обробки мають різні похибки напрямку зуба. Чим більше число зубів зубчатого колеса, тим більше похибка напрямку зуба, тим грубіше ступінь.

У процесі обробки тангенціальним шевінгуванням найбільшого значення кут ΔV досягає при урізуванні і виході шевера і наближається до нульового значення при максимальних деформаціях технологічної системи. Довжина плями контакту в цьому випадку зменшується, що приводить до урізування ріжучих зубців шевера на велику глибину на початку і кінці циклу обробки. Довжина плями контакту є функцією параметрів верстатного зачеплення, а для випадку обробки тангенціальним методом шевінгування, довжина лінії контакту складатиме не менше половини ширини зуба заготовки [8]. Похибка напрямку зуба в цьому випадку визначається по залежності:

$$F_\beta = b_1 \operatorname{tg} \alpha_n \sin \Sigma \sqrt{\frac{\Delta \alpha (2(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1) - \cos^2 \Sigma)}{(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1)(1 + \operatorname{tg}^2 \Sigma)(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1 - \Delta \alpha \cos^2 \Sigma)}}, \quad (10)$$

де F_{β} – похибка напрямку зуба, мм; α_n – нормальний кут зачеплення, град; b_1 – ширина зубчатого вінця заготовки, мм; ΔV – величина кута непаралельності осей, град.

Приведені на рис.2 і рис. 3 графіки показують зміну розрахункового кута схрещування осей залежно від зміни положення центру схрещування осей заготовки і інструменту та кута схрещування осей. На рис. 4 і рис. 5 зображені графіки залежності зміни розрахункового кута схрещування осей залежно від зміни радіусу ділильного кола заготовки, та радіусу ділильного кола шевера.

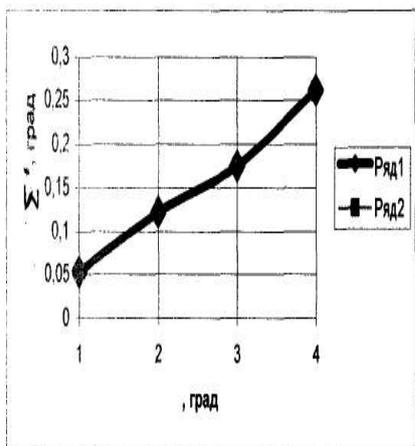


Рис.2.Залежність зміни розрахункового кута схрещування осей від Σ .

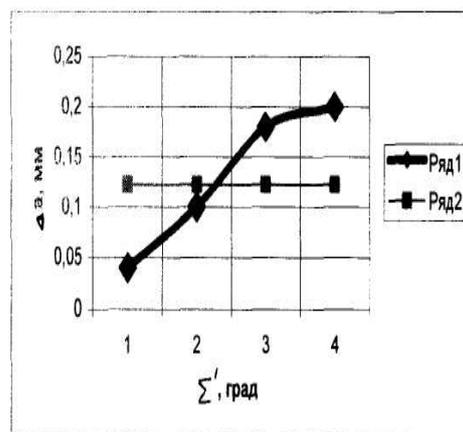


Рис.3.Залежність зміни розрахункового кута схрещування осей від Δa .

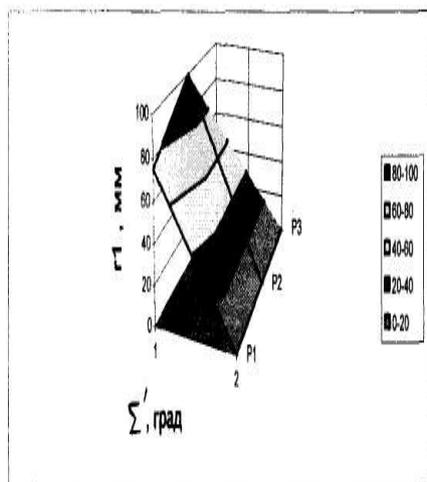


Рис.4.Залежність зміни розрахункового кута схрещування осей від r_1 .

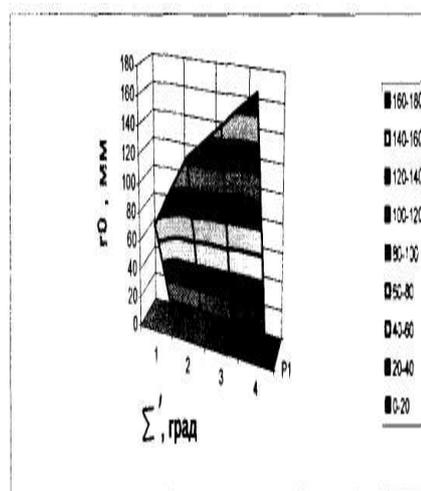


Рис.5.Залежність зміни розрахункового кута схрещування осей від r_0 .

Дослідженнями встановлено, що вплив величини модуля на похибку напрямку зуба, що виникає в процесі термічної обробки, незначний. В той же час величина кута нахилу зуба робить істотний вплив на похибку напрямку зуба в межах однієї ширини вінця. Похибки напрямку зуба залежать від радіальної похибки і похибки форми зубчатого вінця. Оскільки в ГОСТ 1643–81 немає залежності похибки напрямку зуба від радіальних розмірів зубчатого вінця, необхід-

но при нарізанні зубчатих коліс вводити технологічні допуски і відповідні поправки на зміну кута нахилу зуба в процесі термічного або хіміко-термічного зміцнення.

Проведені аналітичні і експериментальні дослідження дозволяють зробити висновок про те, що виникаючі на початку і кінці циклу обробки деформації технологічної системи приводить до зміни кута схрещування осей шевера і заготівки, і як наслідок виникненню похибки напрямку зуба. Зміна величини припуску, що видаляється, в процесі обробки приводить до зсуву плями контакту уздовж зуба заготівки. Найбільша похибка напрямку зуба відповідає заготівкам, що мають найбільше радіальне биття. Зменшення похибки напрямку зуба досягається при збільшенні числа зубів інструменту.

Література: 1. Конструкторско-технологическое обеспечение качества деталей машин / В.П. Пономарев, А.С. Батов, А.В. Захаров. – М.: Машиностроение, 1984. 2. Калашников С.Н., Калашников А.С. Виготовлення зубчатих коліс. – М.: Высшая школа, 1985. – 223 с. 3. Сухоруков Ю.Н. Вплив деформації систем на точність процесу шевінгування зубчатих коліс методом тангенціальної подачі // Передовий науково-технічний досвід. № 6-63-285/34. – М., 1983. – С. 35-45. 4. Уминский С.М. Дослідження впливу параметрів верстатного зачеплення на точність обробки при шевінгуванні методом тангенціальної подачі // Фізичні і комп'ютерні технології в народному господарстві. – Праці 8-й Міжнародної науково-технічної конференції. – Харків: ХНПК “ФЕД”, 2003. – С. 56-61. 5. Захаров А. В., Пономарев В. П., Гудков П.А. Выбор рациональных способов базирования при окончательной обработке термически упрочняемых зубчатых колес // Автомобильная промышленность, 1979, № 1. – С. 22-24. 6. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных / Пер. с англ. под ред. Э.К. Лецкого. – М.: Мир, 1980. – 610 с. 7. Пономарев В.П. Прогнозирование точности изготовления зубчатых колес на основе конструкторско-технологической классификации // Вестник машиностроения, 1979, № 3. – С. 28-31. 8. Сухоруков Ю.Н., Евстигнеев Р.И. Инструменты для обробки зубчатих коліс методом вільного обкату. – К.: Техніка, 1983. – 120 с.

УДК 622.75:629.7

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧЕ ГІДРОДІНАМІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ

Умінський С.М., канд.техн.наук (м. Одеса, Україна)

In conditions munufaktyre hydrodynamical installation for heating the liquids also is approved, allowing to introduce energy technologies of reception of heat.

У ситуації дефіциту і здороження півного палива, немає найактуальніше за проблему ніж гарантоване постачання тепла для споживачів. У зв'язку з цим, перед виробництвом виникло найважливіше завдання щодо створення і впровадження енергозберігаючих технологій і малогабаритного устаткування для забезпечення теплом цехів, приміщень фермерських господарств, сільських дошкільних і шкільних установ, об'єктів охорони здоров'я і побуту.

З літературних джерел відомий теплогенератор Шаубергера [1], в якому у вихрі кінетична енергія осьового руху струменя рідини, перетворюється в енергію теплового руху молекул у ній. В теплогенераторі звужуючий водовід, який забезпечений гвинтовими направляючими, які спрямовують потік у продовжуваний вихор, а у його кінці встановлюється осьова турбіна. Особливістю цієї турбіни є те, що вона не має лопастей, які у звичайних турбінах пересікають потік води і, розриваючи його, затрачують при цьому багато намарне в пусту на

подолання сил поверхневого натягнення та зчеплення молекул води. Однак, незважаючи на деякі позитивні конструктивні рішення, теплогенератор Шаубергера не знайшов практичного використання. Крім цього, відомий вихровий теплогенератор Потапова Ю.С. [2]. Цей теплогенератор містить корпус, який має циліндричну частину, яка оснащена прискорювачем руху рідини, виконаним у виді циклона, торцева сторона якого з'єднана з циліндричною частиною корпусу. Головним елементом конструкції такого теплогенератора [2], є вихрова труба. Коли вихровий потік у трубі рухається до спрямовувача в осевій зоні труби створюється протікання. У ньому вода, теж обертаючись, рухається до штуцера, який врізаний у плоску стінку равлика співосно з трубою, та призначеному для випуску «холодного» потоку. Таким чином відбувається нагрівання рідини. Недоліками вказаного теплогенератора є низька надійність із-за наложення обертаючих частот, низька продуктивність, складність конструкції. У зв'язку цими причинами вихрові теплогенератори не знайшли використання в виробництві.

Мета досліджень: обґрунтувати та розробити енергозберігаючу гідродинамічну установку, яка забезпечує ефективне протікання технологічних процесів у виробництві, які передбачають нагрівання рідин, а також опалення виробничих, житлових приміщень соціальної сфери, та інших об'єктів. У зв'язку з поставленою метою, нами розроблений на рівні патенту України [3] енергозберігаючий гідродинамічний теплогенератор, призначений для систем теплопостачання, систем опалювання і гарячого водопостачання. На рис. 1 представлена загальна схема пропонованої гідродинамічної установки нагрівання рідини.

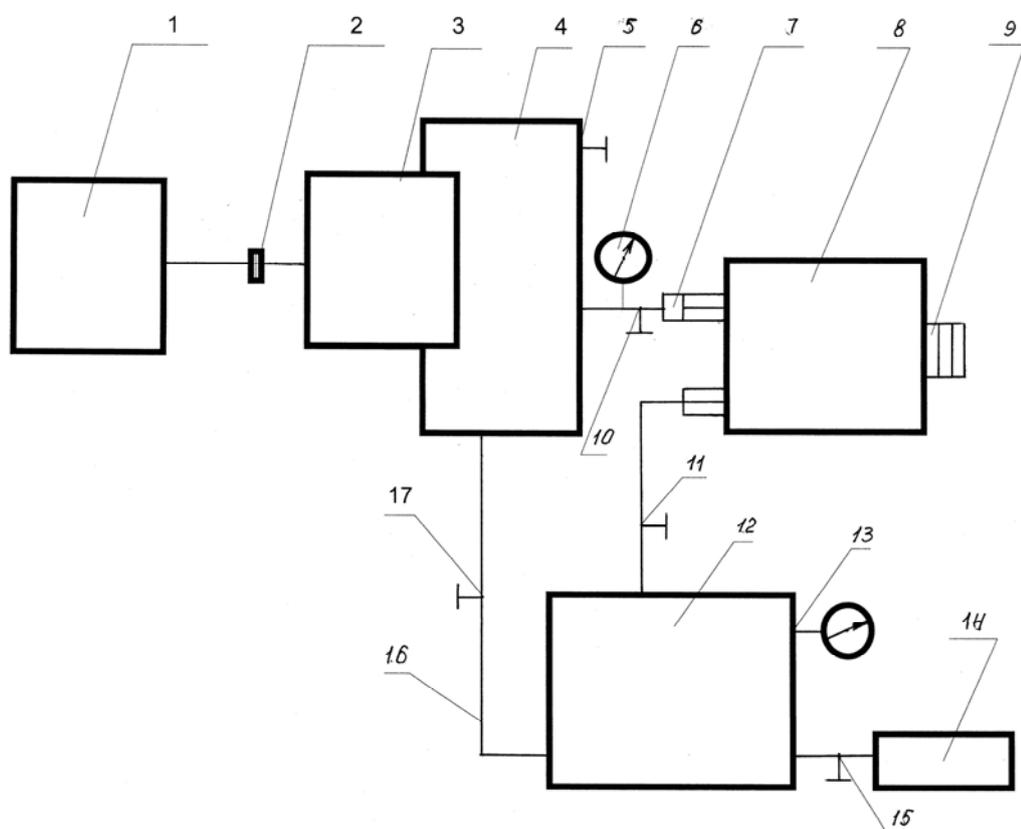


Рис. 1. Загальна схема пропонованої гідродинамічної установки нагрівання рідини.

Установка має приводний електродвигун 1, муфту 2, яка з'єднує насос 3, бай – пас 4, випромінювач 8, крани 10, 5, 11, 15, 17, які призначені для регулювання процесу, манометр 6, ємність 12, термометр 13. В основу установки нагрівання рідини покладено гідродинамічний випромінювач, який перетворює енергію турбулентного затопленого струменю рідини в теплову енергію, нагріваючи рідину. Конструктивна схема гідродинамічного випромінювача представлена на рис. 2. Найбільш доцільним є механізм гідродинамічного випромінювання за рахунок пульсації кавітаційної зони, яка утворюється між соплом 2 і перешкодою 3 (рис. 2). Відбиваючі поверхні можуть бути випуклими, плоскими та ввігнутими. Кращим в енергетичному відношенні є ввігнутий відбивач у вигляді лунки. Гідродинамічний випромінювач

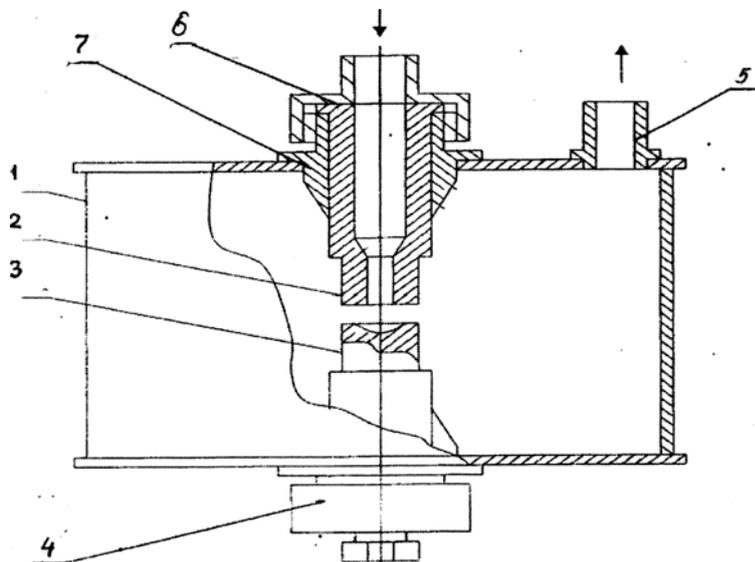


Рис.2. Схема гідродинамічного випромінювача.

працює під тиском рідини, що створюється насосною станцією.

Гідродинамічний випромінювач має вхідний 7 та вихідний 5 штуцери (рис. 2), причому діаметр вихідного штуцера 1,5-2,0 раза більше вхідного. Гідродинамічний випромінювач складається з корпусу 1, в якому розташовані сопло 2 та відбивач 3, регулювального пристрою 4 та завихрювача потоку рідини 6. За допомогою механізму регулювання 4 можна змінювати величину зазору між соплом та відбивачем випромінювача.

Випромінювач настраюється установленням певного зазору між соплом і відбивачем. Оптимальний зазор – 2,9 мм. Контроль режиму роботи випромінювача здійснюється за допомогою спеціального акустичного датчика (гідрофона). У більшості випадків настраювати випромінювач можна на слух за максимумом звучання акустичного режиму. Гідродинамічний випромінювач 8 вмонтований у нагнітальну магістраль установки (рис. 1), вхід якої з'єднаний з насосом 3 через бай-пас 4, а вихід підключений трубопроводом до технологічної ємності 12. На вході випромінювача встановлений завихрювач 7 для підвищення інтенсивності завихрення рідини з метою попереднього нагрівання, виконаний у вигляді втулки з двозаходною внутрішньою різьбою.

Гідродинамічна установка працює таким чином: в режимі нагрівання рідини при вмиканні приводного електродвигуна 1 через муфту 2 починає працювати насос 3 і всмоктує рідину із ємності 12 по магістралі 16 в всмоктувальну магістраль насоса 3, при цьому крани 10, 11, 15 повинні бути закритими, а крани – 5, 17 відкритими. Краном 5 регулюється попередній робочий тиск нагнітаючої магістралі, який контролюється манометром 6. Рідина під тиском проходить по нагнітальній магістралі 7 і потрапляє у випромінювач 8, де про-

ходить нагрівання рідини. Краном 5 регулюється робочий тиск у випромінювачі 8. Рідина, яка пройшла по магістралі через випромінювач попадає в ємність 12, при цьому кран 11 відкритий. Цей режим повторюється декілька разів для нагрівання рідини до певної температури, яка контролюється термометром 13. Нагріта рідина через відкритий кран 15 і магістраль подається до споживача 14, при цьому кран 15 відкритий.

Запропонована установка для нагрівання рідини забезпечує зниження затрат енергії в декілька разів, зменшення металоємності та збільшення продуктивності устаткування і дозволяє підвищити якість та харчову цінність продукції в умовах міні-цехів та фермерських господарств.

Пропонована гідродинамічна установка виготовлена та апробована в умовах виробництва, отримані певні результати (див. табл.1).

Таблиця 1

Порівняльна характеристика вартості 1 кв.м площі приміщення опалюваного різними паливними агрегатами.

Паливний пристрій	Енергозатрати на 1000 кв.м.
Котел газовий КЧМ - 96	46200 м. куб./ година
Електрокотел « Русніт »	94500 кВт
Теплогенератор	17300кВт
Рідкопаливний котел КЧМ-5 з пальником	40320 л ДТ

В процесі випробувань встановлено, що у порівнянні з класичними нагрівачами (ТЕНи і, котли та інш.) гідродинамічний випромінювач має ряд суттєвих переваг, які забезпечують його ефективне використання:

- при однаковій виробничій потужності має на порядок менші габарити;
- за рахунок високого ККД перетворення енергії потоку в енергію ультразвукових коливань споживає значно меншу потужність на привод (1,1 кВт при потужності 2,5 м³/год.);
- забезпечує гнучке регулювання потужності (від 0 до 2,5 м³/год);
- не має рухомих частин, що обумовлює його високу надійність в експлуатації та високий ресурс;
- витрата електроенергії знижується на 20-30% у порівнянні з класичними теплогенераторами, т.ч. задовольняє вимогам енергозберігаючих технологій.

Нагрівання рідини безпосередньо в об'ємі при її русі забезпечує екологічну чистоту, виключає зміну якості складу рідини, появу накипу і інших шкідливих явищ у рідині. Нагрівання рідини здійснюється в одному вузлі без застосування нагрівальних елементів, що забезпечує простоту системи нагрівання, ефективність і безпеку експлуатації установки. За рахунок модульності конструкції і широкого типорозміру установок, продуктивність може бути змінною. Використання сучасної автоматики дозволяє забезпечити автоматичний режим роботи установки і повний контроль технічних параметрів продукту нагрівання. Споживач отримує гарячу воду за заданими температурними параметрами. За рахунок автоматизації процесу відпадає необхідність у постійному обслуговуючому персоналі. Устаткування може вмонтовуватися в будівлі споживача і включатися в іс-

мішування речовини або компонентів на молекулярному рівні із збереженням однорідності суміші на 90 і більше доби); утилізація рідких нафтопродуктів і перетворення їх у паливо (створення стабільних паливних емульсій з нефтошляму); обробка обводненого мазуту, з метою економії до 18%; для знезараження і очищення води безреагентними способами; для обробки дизельного пального з метою його економії, збільшення фільтрованості, зниження зольності, температури застигання, температури спалаху; для обробки нафти з метою збільшення виходу світлих нафтопродуктів; виробництва біодизельного пального; миття склотар і деталей; сушки фруктів, лікарських трав і лісоматеріалів; пастеризації молока і соків; виробництва ліцитину і кормових добавок; виробництва фарб, оліфи і інших будівельних сумішей.

Гідродинамічний теплогенератор за своїми технічними характеристиками і функціональними можливостями відповідає вимогам енергозбереження, що пред'являються до систем локального опалювання приміщень і гарячого водопостачання; апробований у реальних умовах експлуатації, може бути використаний у цехах, господарствах і житлових приміщеннях, технологічних і побутових цілях. Новизна установки захищена патентом України.

Література: 1. Шаурбергер В. Патент Австрії № 117749 від 10.05. 1930 р. 2. Потапов Ю.С. Вихрової теплогенератор. Патент РФ № 2045715, Опубл. 11. 10 . 1995. Бюл. №28. 3. Топилін Г.Е., Умінський С.М. Гідродинамічна установка для нагрівання рідини. Патент на корисну модель UA 31462 F25B29/00 .Заявлено 05.12.2007. Опубл.10.04.2008. Бюл. №7.

УДК 622.75:629.7

УНІВЕРСАЛЬНЕ ГІДРОДИНАМІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ БІОПАЛИВА

Умінський С.М., канд.техн.наук (м. Одеса, Україна)

Dialogue is carried out and installation for reception of biodiesel fuel in conditions manyfaktyre is created.

Європейські країни (Німеччина, Австрія, Франція й ін.) успішно організують виробництво біодизпалива «БДП» для тракторної техніки та автомобілів [1]. Принцип виробництва «БДП» - відбувається етерифікація рапсового масла з метиловим або етиловим спиртом при наявності молочного каталізатора. Результатом етерифікації є активізована суміш, вміщуюча біодизельне паливо, гліцерин і інші компоненти. За кордоном, наприклад, країнах ЄС, комплекс «виробництво олії - отримання біодизеля» збирається в єдиному виробничому циклі.

Основні виробники «БДП» в країнах ЄС: Diester Industrie (Франція); INEOS Chlor (Великобританія); ADM, RVM (Германія); Novaol, DR Lubrificanti (Італія); Bionet Europa SC (Іспанія).

В Європі щорічно виробляється 600 тис. т. біопалива. За останні 10 років попит на «БДП» виріс на 5 млн. т. Прогнозується в закордонних країнах виробництво біодизпалива до кінця 2010 р. – 12 млн. т. Загальна ж потреба – 25 млн. т. В Україні склались об'єктивно умови для освоєння виробництва «БДП» на основі рапсового масла, перед усім на міні заводах, агровиробництвах. Такий

прецедент вже є, наприклад, Польська компанія «Man – Zoil». Вирішення проблеми виробництва біодизеля передбачено і в Україні (Указ Президента, України №1094). Згідно указу, міністерством аграрної політики України сформульована концепція державної програми по розробці и впровадженню технологій і обладнання для виробництва альтернативного палива включаючи «БДП»[2,3].

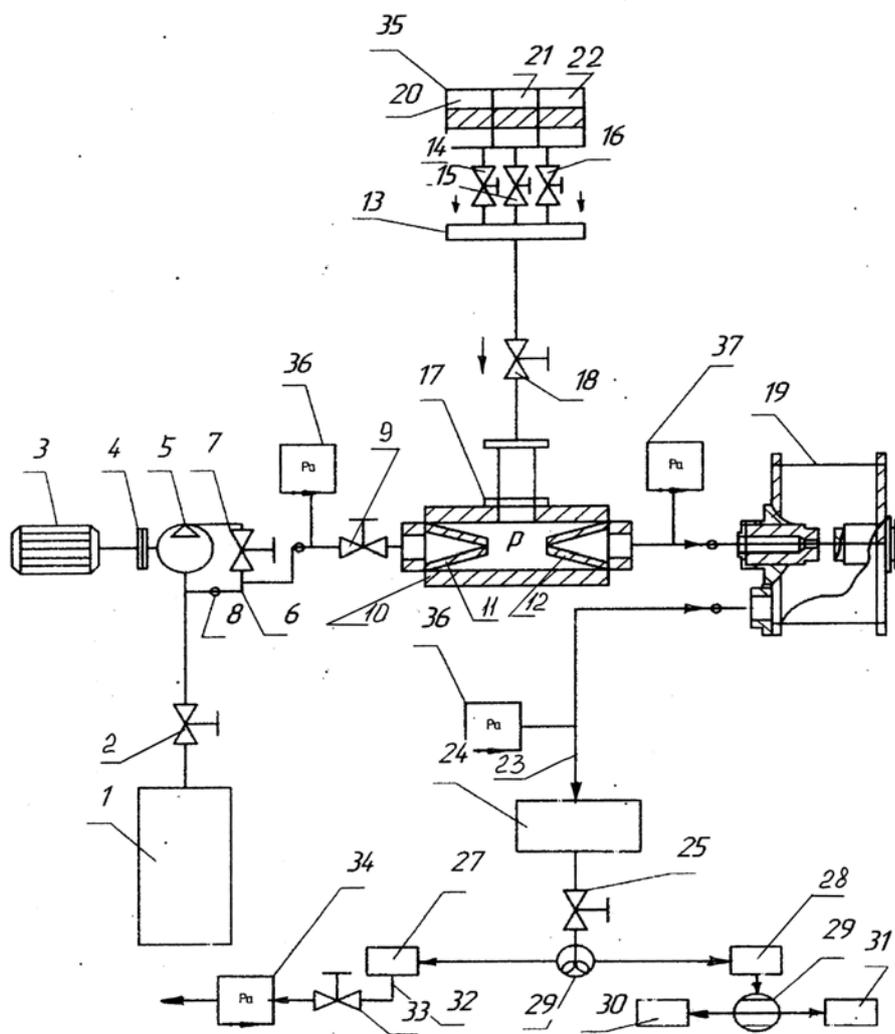


Рис. 1. Універсальна установка для виробництва біопалива.

Мета досліджень – розробити універсальну гідродинамічну установку для виробництва «БДП» на основі диспергування на молекулярному рівні рапсової олії з етанолом в присутності молочного каталізатору (наприклад, гідроксиду натрію). Принципова схема універсальної установки для отримання «БДП» представлена на рис.1. Установка включає в себе технологічну ємність 1 для сировини (рапсове масло), гідростанцію, що складається з електродвигуна 3, муфти 4, насоса 5, бай – паса 6 і вентилятора 7 для регулювання тиску олії в системі. Бай – пас 6 нагнітаючою магістраллю 8 і через кран 9 з'єднаний з дозатором – змішувачем 10 інжекторного типу і гідродинамічним диспергатором 19. Дозатор – змішувач 10 і диспергатор 19 встановлені послідовно, при чому вихід дозатора з'єднаний з виходом диспергатора. Дозатор – змішувач 10 має полость розрідження «Р» між соплом 11 і розширювачем 12, розміщеним в його корпусі назустріч одне одному. Порожнина розрідження дозатора трубопроводом 17 через кран 18, з'єднана з колектором 13. Колектор 13 з'єднаний арматурою через крани 14, 15 і 16 з внутрішніми порожнинами бака 35, що має три секції 20, 21 і 22 для компонентів. Секція 20 призначена для дизельного палива нафтового походження, секція 21 – для метанолу, секція 22 – каталізатора (гідроксид натрію). Вихід дозатора 10 з'єднаний з

регулювання тиску олії в системі. Бай – пас 6 нагнітаючою магістраллю 8 і через кран 9 з'єднаний з дозатором – змішувачем 10 інжекторного типу і гідродинамічним диспергатором 19. Дозатор – змішувач 10 і диспергатор 19 встановлені послідовно, при чому вихід дозатора з'єднаний з виходом диспергатора. Дозатор – змішувач 10 має полость розрідження «Р» між соплом 11 і розширювачем 12, розміщеним в його корпусі назустріч одне одному. Порожнина розрідження дозатора трубопроводом 17 через кран 18, з'єднана з колектором 13. Колектор 13 з'єднаний арматурою через крани 14, 15 і 16 з внутрішніми порожнинами бака 35, що має три секції 20, 21 і 22 для компонентів. Секція 20 призначена для дизельного палива нафтового походження, секція 21 – для метанолу, секція 22 – каталізатора (гідроксид натрію). Вихід дозатора 10 з'єднаний з

виходом гідродинамічного диспергатора 19. Одночасно вихід із диспергатора трубопроводом з'єднаний з технологічною ємністю 24, для гідродинамічної активної суміші рапсового масла з компонентами, що надходять із секції 20, 21 і 22 бака 35 через колектор 13 і дозатор – змішувач 10. Ємність 24 через кран 25 з'єднана з сепаратором 26 для розділення фаз «біодизель» і «водно – гліцерина суміш», відповідно поступаючих в ємності 27 і 28. Ємність 28 для «водно – гліцерина суміші» з'єднана з фільтром волого-очисником 29, який в свою чергу з'єднаний з ємністю 30 для гліцерину і 31 для збору вологи (води). Ємність 24 оснащена дренажним трубопроводом 32 з краном 33 для видачі готової продукції. Установа обладнана вимірювальними приборами (манометром 36, датчиком температури 37, витратоміром біодизеля 34). [4,5,6] Установа конструктивно виконана по модульно – блочному типу, універсальна [7,8]. Універсальність установки передбачується її можливістю працювати в трьох режимах, а саме:

1. Отримання «БДП» на основі диспергування холодно пресованого очищеного рапсового масла (РМ), дизельного палива (ДП) нафтового походження і метанолу (М), з впливом каталізатора (К).
2. Отримання «БДП» на основі чистого метилового ефіру (МЕ), з динамічно активізованої суміші (РМ) і (М) обробленого каталізатором (К) .
3. Отримання «БДП» з суміші «ДТ» та «РМ» диспергуванням компонентів на молекулярному рівні.

Універсальна установка працює в режимах 1, 2 і 3 таким чином. В режимі 1 - крани 14, 15, і 16 бака 35 відчинені для проходження в дозатор змішувач 10 всіх компонентів. При включенні приводного електродвигуна 3 через муфту 4 починає обертати гідронасос 5, який всмоктує «РМ» з ємності 1 в бай – пас 6 і напірну магістраль 8, установки. Після цього краном 6 бай паса регулюється робочий тиск в магістралі 8, який контролюється манометром 36. Рапсове масло під тиском проходить по напірній магістралі 8 при відкритому крані 9 і попадає в дозатор – змішувач 10. Одночасно при відкритих кранах 14, 15 і 16 із секцій 20, 21 і 22 бака 35 в колектор 13 потрапляють компоненти («ДТ», «МТ» І «К»), які завчасно в ньому змішавшись, всмоктуються через відкритий кран 18 і трубопровід 17 в порожнину розрідження «Р» дозатора 10. В дозаторі-змішувачі 10 рапсове масло інтенсивно насичується компонентами («ДТ», «М» і «К»). Попередньо насичена суміш попадає в гідродинамічний кавітатор 19. В кавітаторі 19 виконується глибоке диспергування суміші компонентів з «РМ» на молекулярному рівні. Активована суміш одержуючи властивості «БДП» поступає по трубопроводу 23 в технологічну ємність 24, а потім – в сепаратор 26 при відкритому крані 25. В сепараторі 26, суміш розділяється на фази «біодизель» і «водно- гліцерина суміш», потім кожна фаза поступає в відповідні ємності 27 і 28. Далі «водно – гліцерина суміш» подається з ємності 27 в фільтр- вологоочисник 29, де розділяється на гліцерин і воду. Гліцерин зливається в ємність 30, а волога (вода) в ємність 31. В результаті готова продукція «БДП» з ємності 27 по трубопроводу 32 при відкритому крані 33 через витратомір 34 видається споживачеві. Гліцерин може бути використаний при виробництві кормових добавок .

В режимі 2 - установка працює при закритому крані 14 і відкритих кра-

нах 15 і 16 для потрапляння відповідних компонентів (метанолу і каталізатора) через колектор 13 в порожнину розрідження «Р» дозатора змішувача 10. Технологічний процес отримання «БДП» аналогічний роботі в режимі 1. В режимі 3 - установка працює при закритих кранах 15 і 16 бака 35 і відкритому крані 14 для потрапляння «ДТ» нафтового походження через трубопровід 13 в порожнину розрідження «Р» дозатора-змішувача 10. В подальшому, подібним чином, як і по п.п.1 і 2, протікає технологічний процес отримання «БДП» на основі диспергування «ДТ» і «РМ». Установка апробована, отримані результати наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Властивості біодизельного палива та дизельного палива нафтового походження

Вид палива	Показники			
	Цетанове число	Кінематична вязкість при $t=20^{\circ}\text{C}$, $\text{мм}^2/\text{с}$	Температура спалаху $^{\circ}\text{C}$	Щільність при $t=20^{\circ}\text{C}$, $\text{кг}/\text{м}^3$
Біодизельне паливо з рапсової олії	50	7,83	50	850
Дизельне паливо нафтового походження	48	6,0	40	860

Універсальна установка для виробництва біодизельного палива випробувана в ЮНТЦ (УААН), отримані обнадіюючі результати, а саме:

- біодизельне паливо по своїм фізико – експлуатаційним властивостям практично не відрізняється від дизельного палива нафтового походження;
- викиди відпрацьованих газів значно зменшуються;
- викиди твердих частин зменшуються до 50 %;
- працездатність дизелів практично не змінюються без конструктивної модернізації основних вузлів і агрегатів;
- робота дизельних двигунів на біодизельном паливі екологічно безпечна, що має велике значення для захисту навколишнього середовища;
- продуктивність установки 1100 л/год біодизельного палива.

Виробництво біодизельного палива можна легко організувати, в т. ч. в умовах фермерського господарства. Вартість біодизельного палива в даний час не перевищує вартість традиційного нафтового дизельного палива і має тенденцію до зниження. Біодизельне паливо отримало широке розповсюдження в багатьох країнах світу, серед яких, Германія, Австралія, Австрія, Чехія, Франція, Італія, Швеція, США, а також інші країни. Спеціалісти по моторній техніці вважають біодизельне паливо кращим паливом для двигунів з самозапалюванням. Спираючись на закордонний досвід, розроблена нами установка буде корисною для вирішення проблем забезпечення виробництва України дизельним паливом.

Література: 1. Біопалива (технології і обладнання)/ В.О. Дубровін, М.О. Корчений, І.П. Масло та інш. – К.: «Енергетика і електрифікація», 2004 – 256 с. 2. Установка БДД для производства биодизельного топлива // Инф. листок EXW(FCA) Днепропетровск, @ 2005 biodisel. dr. ua. Allrights reserved/ last update: Thu, 16 Mar 2006 19:37:57 GMT. 3. Г.Є. Топілін, С.М. Умінський. Гідродинамічна установка для отримання біодизельного палива. Патент на корисну модель UA 31463

C10L8/00. Заявлено 05.12.2007. Опубл.10.04.2008. Бюл. №7. 4. Топілін Г.Є., Умінський С.М. Розвиток методів та технологічних засобів виробництва біодизельного палива // Аграрний вісник Причорномор'я. Збірник наукових праць. Технічні науки. Вип. 40. – Одеса, 2007. – С. 84-88. 5. Топілін Г.Є., Умінський С.М. Гідродинамічний апарат для отримання екологічно чистого біодизельного палива // Матеріали 12 міжн. науч. конф. „Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв” 8-12 вересня 2008р. – Одеса. – С. 119-121. 6. Genadiy Topilin, Sergiey Uminski Biodiesel fuel for agricultural manufacture. Polish Academy of science. Departament in Lublin. Commission of motorization and power industry in agriculture .TeKa . Lublin . 2008. Volume 8-7 . p 283-287. 7. Топілін Г.Є., Умінський С.М. Использование гидродинамических аппаратов в агропроизводстве // Аграрний вісник Причорномор'я. Збірник наукових праць. Технічні науки. Вип. 40. – Одеса, 2007. – С. 64-79. 8. Топілін Г.Є., Умінський С.М. Універсальна установка для виробництва біодизельного палива. Патент на корисну модель UA 37619 C10I 5/40. Заявлено 18.04.2008. Опубл. 10.12.2008. Бюл. №23.

УДК 666.973.6:517.8

ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН НА ВЛАСТИВОСТІ БІНАРНОГО НАПОВНЮВАЧА ТА ПІНОБЕТОНА

Мартинова О.Б., канд. техн. наук, **Мартинов Є.В.**, канд. техн. наук
(м. Одеса, Україна)

Influence of humidity and surface-active substance on properties of foam concrete with use binary filler is estimated

Одне з найважливіших завдань сучасного будівництва - зниження матеріалоемності – вирішується за рахунок застосування ефективних матеріалів, що дозволяють управляти конструктивними та теплоізоляційними властивостями будівельних конструкцій. В Україні існує дефіцит виробництва ефективних конструктивно-теплоізоляційних матеріалів, таких як ніздрюваті бетони. Призначення ніздрюватих бетонів у будівництві спрямоване на максимальне використання їх функціональних властивостей, у першу чергу - низьку теплопровідність. Це, у свою чергу, обумовлює їхню область застосування для умов експлуатації в повітряно-сухих середовищах. Умови експлуатації будинків і споруджень у Причорноморському регіоні відрізняються значними коливаннями вологості протягом року.

Мета досліджень – дослідити властивості пінобетону, пов'язані з вологовмістом і вологостійкістю, які в цей час недостатнє досліджені внаслідок того, що не регламентуються нормативними документами. Оцінити вплив вологості й поверхнево-активної речовини на властивості пінобетону з використанням бінарного наповнювача. Досягти зниження собівартості пінобетону.

Результати досліджень. Продукція з пінобетону неавтоклавного твердіння відрізняється досить високою витратою цементу. У сучасних умовах вартість енергоносіїв постійно підвищується, що позначається на підвищенні вартості цементу й, отже, собівартості пінобетону. Крім того, цементний гель, що утворюється в результаті гідратації цементу, є основним джерелом підвищеної вологісної усадки. Тому необхідно прагнути до зниження витрати цементу та максимальною заміною його наповнювачем. Для розв'язку цих завдань було реалізовано два експерименти. У першому вивчався вплив вологості та поверхнево-активної речовини на властивості наповнювачів. У якості ПАР (поверхнево ак-

тивна речовина) виступав піноутворювач ПБ-2000, бінарний наповнювач складався із суміші кварцового та карбонатного наповнювачів у їхніх різних співвідношеннях. Для здійснення експерименту були відібрані зразки з різним співвідношенням кварцового та карбонатного наповнювачів і визначені значення їх насипної густини в наступних станах: висушеному до постійної маси, з вологістю бінарного наповнювача 5%, з вологістю 10% і вологістю 10% з добавкою 2 % поверхнево-активної речовини (не спіненого піноутворювача ПБ-2000).

За отриманими значенням насипної й дійсної густини, для кожного виду бінарного наповнювача були отримані значення пустотності по формулі:

$$P = 1 - \frac{\rho_{нас}}{\rho_d} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де P – пустотність, %; $\rho_{нас}$ – насипна густина суміші, $г/см^3$; ρ_d – дійсна густина суміші, $г/см^3$.

Дійсна густина суміші наповнювачів визначалася по формулі:

$$\rho_d = D_{CaCO_3} \cdot \rho_{CaCO_3} + D_{SiO_2} \cdot \rho_{SiO_2}, \quad (2)$$

де ρ_d – дійсна густина суміші, $г/см^3$; D_{CaCO_3} – частка карбонатного піску в бінарному наповнювачі, дол. од.; ρ_{CaCO_3} – дійсна густина карбонатного піску, $г/см^3$; D_{SiO_2} – частка кварцового піску в бінарному наповнювачі, дол. од.; ρ_{SiO_2} – дійсна густина кварцового піску, $г/см^3$.

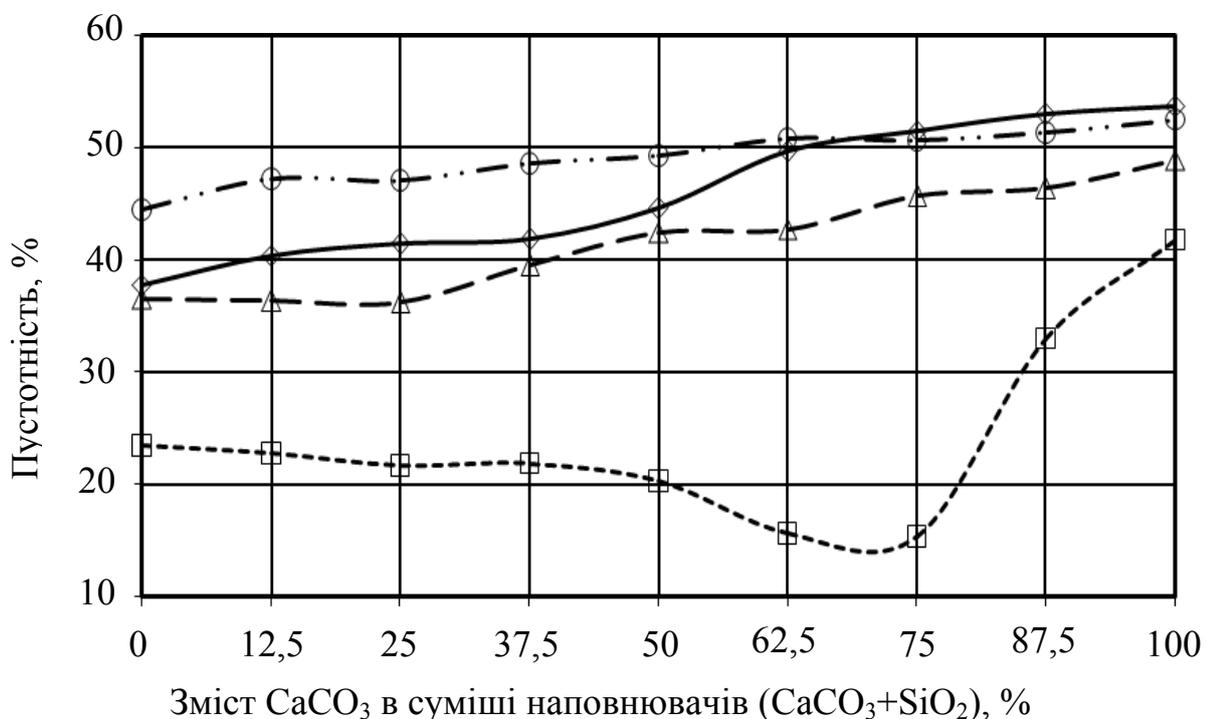


Рис.1. Пустотність бінарного наповнювача в різних станах вологості і в присутності ПАВ:

—◇— вологість – 0 %; ---△--- – 5 %; вологість
 -...○-... – вологість 10 %; - - -□ - - - – 10 % + вологість 2 % ПАВ.

Дійсна густина визначалася методом Ле- Шательє. Результати досліджень відображено на рис. 1. У ході експерименту було визначено, що введення ПАР значно знижує пустотність бінарного наповнювача. Як видно на графіку характер кривих пустотності бімінерального наповнювача в різних станах вологості практично ідентичний - пустотність збільшується в міру збільшення змісту карбонатного наповнювача. Однак уведення ПАР змінює характер кривої пустотності. В області наповнювачів утримуючих від 50 до 90 % карбонатного наповнювача відзначається різке зниження пустотності бінарного наповнювача.

Апроксимація кривої пустотності бімінерального наповнювача дозволила описати її логістичним рівнянням:

$$P = \frac{8,34 - 24,3 \cdot H + 18,3 \cdot H^2}{0,36 - 0,95 \cdot H + 0,65 \cdot H^2}, \quad (3)$$

де P – пустотність, %; H – частка карбонатного наповнювача в суміші наповнювачів.

Наступною частиною роботи було дослідження впливу бінарного наповнювача на властивості пінобетону з використанням методів математичного планування експерименту [1, 2]. В експерименті в якості застосовуваних матеріалів використовували: бездомішковий цемент виробництва ВАТ "Балцем" (м. Балаклея, Харківська область) марки М500, у якості кремнеземистого наповнювача застосовували кварцовий пісок, просіяний через сито 0,63. У якості другого наповнювача застосовувався карбонатний пісок, просіяний через сито 0,63, одержуваний з відходів камнепилення вапняку-черепашнику. Піноутворювач синтетичний ПБ-2000, виробництва ВАТ «Івхімпром» (Росія, м. Іваново).

Змінними факторами були: перший - вміст наповнювача в суміші із цементом, другий - вид наповнювача. Кварцовий наповнювач у вигляді піщаних фракцій, є інертним. Однак, при збільшенні дисперсності, крім звичайних функцій - зниження водопотреби, підвищення зручності вкладання, збільшення тріщиностійкості й економії в'язучого, він також починає проявляти ефект активної складової. Дрібні часточки кремнезему служать додатковими центрами кристалізації [3]. Карбонатний наповнювач, у свою чергу, сприяє зменшенню водовідділення, водопотреби й розшарування суміші, підвищенню водоутримуючої здатності, пластичності, однорідності, зниженню усадки, а також підвищує водо-, морозостійкість розчину. Крім того, важливою особливістю карбонатних порід є те, що вони не інертні, і вступають в активну фізико-хімічну взаємодію із клінкерними мінералами цементу [4]. Варіювалася загальна частка зерен наповнювача в сухій суміші із цементом ($0,25 \pm 0,20$) і масове співвідношення між піском кварцовим ($\square 1$) і вапняковим (+1), причому їх відношення 1:1 відповідало рівню "0".

Для оцінки впливу кількості та виду наповнювача були побудовані однофакторні залежності властивостей. На графіках однофакторних залежностей були додані криві, що проходять через центр експерименту, що дозволяє виявити асиметричність дії комплексу факторів складу.

Збільшення змісту наповнювача в зоні "0" і зоні мінімальних значень приводить до зниження густині (рис 2.а). При розгляді впливу виду наповнюва-

ча, видно, що для зони низьких густин мінімальне значення густині досягається при використанні комбінації із двох наповнювачів - кварцового й карбонатного пісків. Однак ця ж комбінація відповідає максимальному значенню густині в зоні підвищених значень.

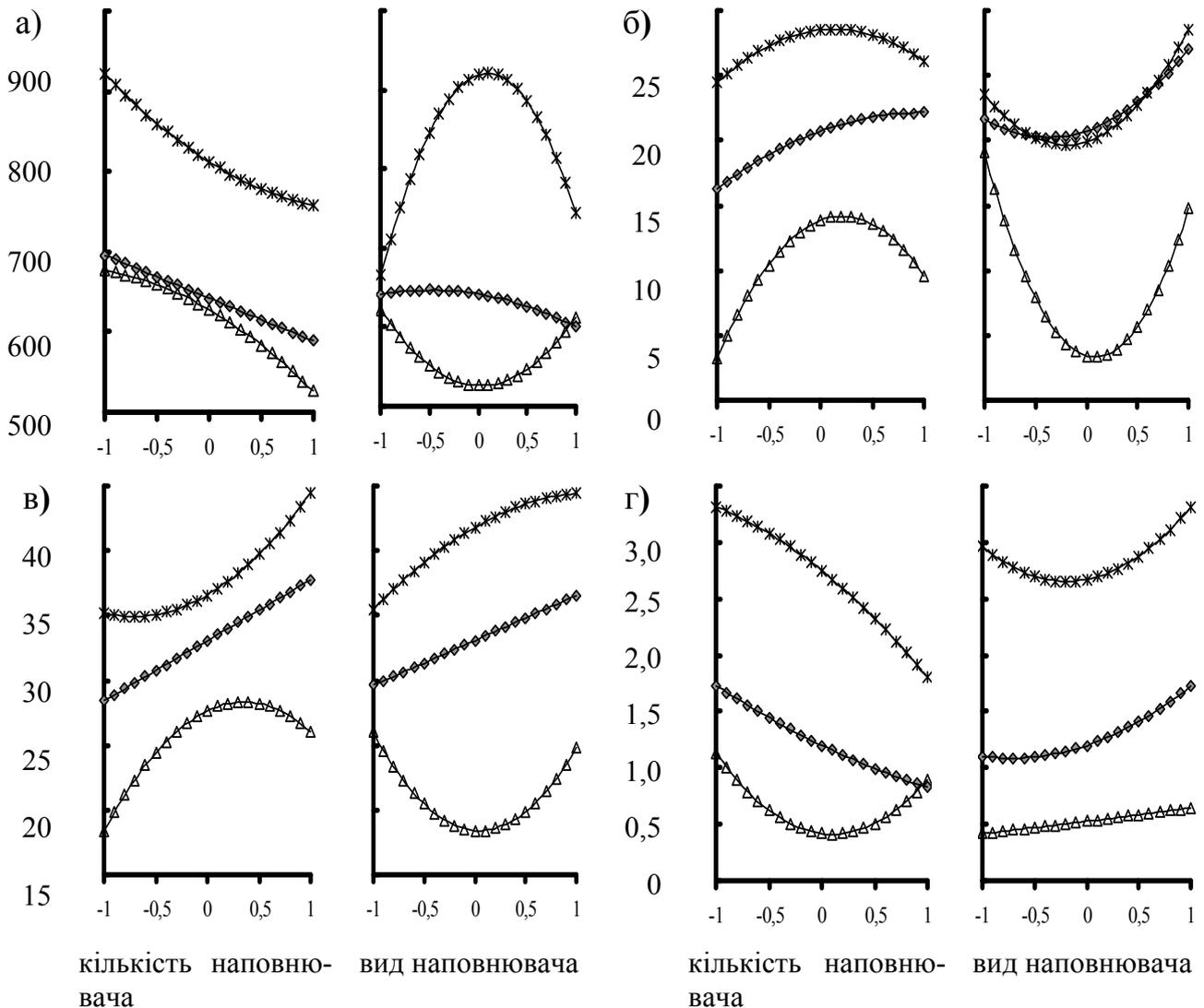


Рис. 2. Однофакторні залежності: а) густині в сухому стані, kg/m^3 ; б) вологості, %; в) водопоглинення, %; г) міцність у сухому стані, kg/cm^2 .

Зниження вологості й водопоглинення спрямоване від карбонатного до силікатного піску у бік зниження кількості наповнювача в пінобетонній суміші (зона "0"). При цьому в зоні мінімальних значень водопоглинення крапка мінімуму спостерігається в суміші карбонатного та силікатного наповнювачів у співвідношенні 1:1 (рис. 2.в). Аналогічна поведінка кривої спостерігається в крапці мінімуму вологості (рис. 2.б).

На однофакторних залежностях (рис. 2.г) показаний вплив факторів на міцність пінобетону в сухому стані. Зміст наповнювача у всіх зонах веде до зниження міцнісних характеристик. Інтерес представляє вплив виду наповнювача. Так, у зоні мінімальних значень мінімум міцності розташовується в зоні "0", тобто при використанні бінарного наповнювача в співвідношенні 1:1 CaCO_3 і SiO_2 .

Висновки. Уведення поверхнево-активної речовини приводить до різкого

зниження густиніості, що свідчить про більш щільне впакування зерен наповнювача. Проведений експеримент показав доцільність використання бінарних наповнювачів для підвищення властивостей пінобетону.

Література: 1. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. – 2-ое изд. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 263 с. 2. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. – К.: Выща школа, 1989. – 328 с. 3. Зинов И.А. Высокопрочный бетон с добавкой микрокремнезема / И.А. Зинов, С.П. Горбунов // Известия вузов: Строительство и архитектура, 1990. – № 4. – с. 55. 4. Маилян Р.Л. Бетон на карбонатных заполнителях / Р.Л. Маилян. - Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. ун-та, 1967.— 272 с.

УДК 621.914.025.7

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГИПЕРБОЛИЧЕСКОЙ ПРОИЗВОДЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Чевычелов С.А., канд. техн. наук, **Гладилин В.С.,** аспирант
(г. Курск, Россия)

This article is dedicated to the theoretical basics of shaper tools development for hyperbolic-shaped shafts. Analytic derivation of mathematical dependency for producing discrete representation and transformation of generating curve and some features of projected tools are analyzed.

В тяжело нагруженных подвижных передачах наряду с классическими шлицевыми и шпоночными используются профильные соединения деталей с криволинейными поверхностями, позволяющие повысить эксплуатационные характеристики узла. Но криволинейный профиль деталей, например, равноконтурный профиль, в изготовлении значительно сложнее прямолинейного. Поэтому возникает задача высокопроизводительного получения такого или сходного по геометрическим характеристикам профиля в условиях современного производства.

Одним из способов получения криволинейного профиля является фрезерование заготовок круглого сечения сборными фасонными фрезами. Существующие на сегодняшний день фрезы сложны в проектировании и качество получаемой поверхности напрямую зависит от количества сменных многогранных пластин (СМП), установленных на корпус фрезы. При этом формирование выпуклого профиля производится СМП с радиусными или прямолинейными режущими кромками, поэтому итоговая производящая поверхность получается искаженной, что приводит к увеличению остаточных слоев на обработанной поверхности [1].

В работе [2] показано, что гиперболическое профильное соединение может использоваться в тех же подвижных соединениях деталей для передачи вращающего момента, где обычно применяются равноконтурные соединения. Исследования показали, что форма кривой незначительно влияет на прочностные и эксплуатационные характеристики профильного соединения. Ее выбор, главным образом, определяется технологическими возможностями обработки деталей.

Известно, что гиперболоид может быть получен вращением прямой ли-

нии g вокруг скрещивающейся с ней оси i (рисунки 1, 2) [3]. Следовательно, можно подобрать такие параметры гиперboloида, а именно, расстояние между скрещивающимися прямыми (образующей и осью) R_H и угол наклона образующей λ , при которых получаемая производящая поверхность будет формировать требуемый контур детали, близкий по конфигурации равноконтурному.

Для аналитического вывода зависимости получаемого контура детали от параметров гиперboloида рассмотрим схему контакта инструмента и заготовки (рис. 1). Координаты точки A могут быть получены из дискретного представления профиля вала. В этой точке одна грань профиля переходит в другую (угол поворота относительно оси Y составляет 60°). Переход из системы координат инструмента к системе координат детали производится приращением ΔY .

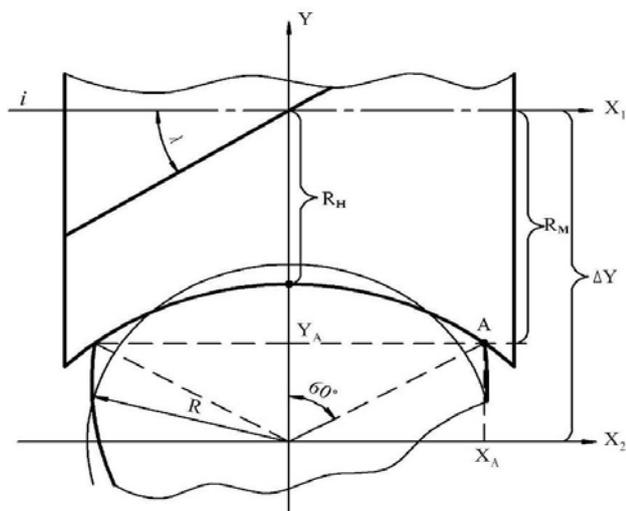


Рис. 1. Схема контакта инструмента и заготовки.

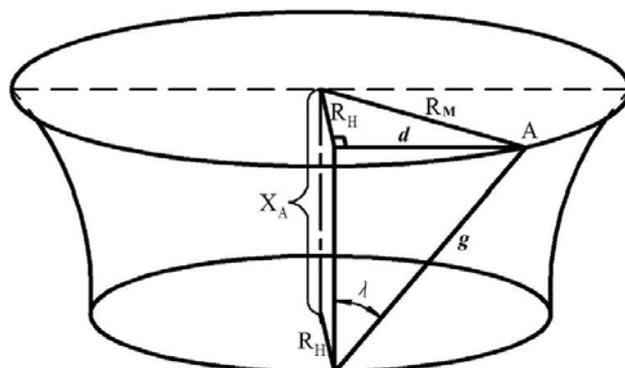


Рис. 2. Вспомогательная схема геометрии гиперboloида.

Для оценки и сравнения требуемого и получаемого контура детали переходим к дискретному представлению сечения вала. Исходными параметрами для проектирования являются диаметр средней окружности D_{PK} и эксцентриситет e . Для удобства вывода аналитической зависимости соединим опорные точки отрезками с длинами d и g (рис. 2). Отсюда:

$$\operatorname{tg} \lambda = d / X_A .$$

Максимальный радиус гиперboloида, необходимый для получения требуемого профиля вала (рис. 2):

$$R_M = \sqrt{R_H^2 + d^2} ,$$

исключим неизвестную величину d :

$$R_M = \sqrt{R_H^2 + X_A^2 \operatorname{tg}^2 \lambda} ;$$

этот же радиус из разности координат при переходе из одной системы координат в другую:

$$R_M = \Delta Y - Y_A .$$

Приращение ΔY для перехода из одной системы координат в другую рассчитывается по формуле:

$$\Delta Y = R_H + R - e.$$

Приравнивая выражения для R_M , полученные из двух схем

$$R_H + R - e - Y_A = \sqrt{R_H^2 + X_A^2 \operatorname{tg}^2 \lambda},$$

получаем аналитическую зависимость для одной грани гиперболического профиля:

$$y = R_H + R - e - \sqrt{R_H^2 + x^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \lambda},$$

где x, y – координаты точек грани профиля, R_H – наименьший радиус гиперболоида, R – радиус средней окружности профиля, λ – угол наклона образующей гиперболоида.

Таким образом, каждая из множества образующих гиперболоида при вращении вокруг оси полностью формирует заданный профиль. Расположив СМП с прямолинейными режущими кромками вдоль этих образующих, при повороте гиперболоидного инструмента получим заданный профиль, который будет формироваться каждым зубом фрезы.

При проектировании подобного инструмента требуется учитывать радиусы скруглений пластин и обеспечивать перекрытие режущих кромок, что достигается расположением СМП с осевым смещением каждой относительно предыдущей. Также стоит отметить, что параметры установки СМП, обеспечивающие углы резания в соответствии с требованиями к материалу заготовки и режимам обработки, рассчитываются по аналогии с обычными сборными фасонными фрезами.

В данной статье рассмотрены теоретические основы проектирования фасонного инструмента, формирующего криволинейную поверхность валов, в частности, геометрические особенности гиперболической производящей поверхности такого инструмента. Приведён аналитический вывод зависимости для получения дискретного представления производящей поверхности и проанализированы особенности проектируемого инструмента. В статье представлены результаты работы по теме 1.9.09, выполняемой по заданию Федерального агентства по образованию Курскому государственному техническому университету на проведение в 2009 году научных исследований по тематическому плану научно-исследовательских работ и при финансовой поддержке КурскГТУ – грант 1.77.09П/2.

Литература: 1. Чевычелов С.А. Влияние схемы формообразования на шероховатость получаемой поверхности [Текст] / С.А. Чевычелов // Автоматизация и современные технологии. 2004. №12. – С. 6-8. 2. Чевычелов С.А. Сравнительное моделирование работы профильных соединений [Текст] / С.А. Чевычелов, В.С. Гладилин // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации. 2008. 3. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике [Текст] / М.Я.Выгодский. – М: Наука, 1977. – 872 с.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РЕВЕРСУВАННЯ СТОЛУ В ПЛОСКОШЛІФУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТАХ

Струтинський В.Б., докт. техн. наук, Тіхенко В.М., канд. техн. наук
(м. Київ, м. Одеса, Україна)

The acceleration law of longitudinal table feed of surface grinding machine must be chosen from the minimum conditions of inertial forces. The wide-range digital electrohydraulic drive of table feed with an operative microprocessor device can be used for the realization of this law.

В плоско- та профілезліфувальних верстатах подовжня подача столу здійснюється гідравлічними приводами з об'ємно-дросельним керуванням. Закон зміни швидкості подовжньої подачі столу звичайних плоскошліфувальних верстатів має вигляд, показаний на рис. 1.

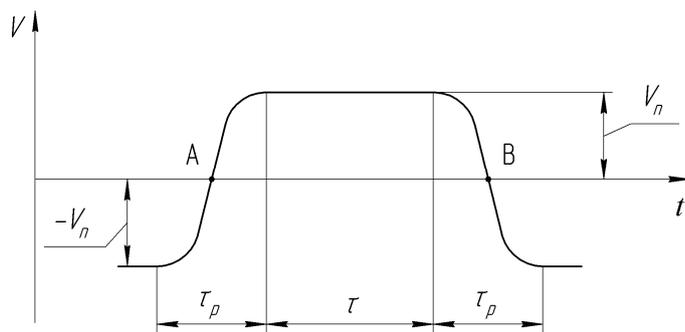


Рис. 1. Закон зміни швидкості подовжньої подачі столу; v_n – стала швидкість подачі; τ – час ходу столу із сталою швидкістю; τ_p – час реверсу; А і Б – точки реверсування ($v = 0$).

Бажано, щоб коливання, що виникають при реверсуванні, завершувалися до відновлення контакту деталі з кругом. Для підвищення плавності реверсу час перехідного процесу збільшують, але при цьому зростають вибігання столу, що знижує продуктивність обробки. Крім того, максимальні відносні коливання можуть відбуватися не в середині, а на початку процесу гальмування, коли шліфувальний круг ще не зійшов з деталі. У такому разі збільшення ходу столу не дає бажаних результатів. При використанні верстата для операцій швидкісного шліфування величина швидкості подовжньої подачі столу значно зростає. З підвищенням швидкості подачі збільшується висота мікронерівностей, але знижується вірогідність зміни структури поверхневого шару деталі. При зниженні швидкості мають місце зворотні явища.

Забезпечити високу продуктивність процесу шліфування можна при скороченні часу реверсу. При цьому слід виключити виникнення ударів і ривків під час реверсу, оскільки це викликає коливання несучої системи верстата і знижує якість обробки.

У зв'язку з цим вимоги до закону зміни швидкості подовжнього переміщення столу можуть бути сформульовані таким чином:

- 1) швидкість руху подовжньої подачі деталі повинна залишатися незмінною на всій довжині обробки;
- 2) час реверсу повинен бути значно менше часу руху;
- 3) реверс столу повинен бути плавним без ударів і ривків.

У гідрофікованих верстатах із зворотно-поступальними переміщеннями вузлів дію збурень на несучу систему верстата можна розглядати як дію деякого зовнішнього імпульсу сил інерції, величина якого визначається масою m і

швидкістю v переміщення вузла, а форма (тобто закон зміни сил інерції в часі) і тривалість – настройкою системи, яка реалізує реверс. Крім того, форма імпульсів прискорень при реверсі змінюється залежно від швидкості столу, сил тертя в його напрямних, параметрів гідроприводу та ін.

Для гідроприводів плоскошліфувальних верстатів характерні імпульсні збурення, які описуються плавними кривими без інтенсивних високочастотних складових і без різких стрибків, тобто такі, що мають плавний характер зміни похідній прискорення [1]. Аналіз спектрального складу показує, що основна частина енергії імпульсу зосереджена в низькочастотній області до 30-40 Гц.

Для того, щоб амплітуди відносних коливань інструменту і заготовки були найменшими, імпульс сил інерції повинен мати таку форму, для якої при мінімальній тривалості дії імпульсу переважна частина його енергії була б зосереджена в якомога вузьчій смузі низьких частот. Відомо, що цій умові задовольняє закон прискорення столу при реверсі [1]:

$$R_i = R \cos^2 \frac{\pi}{\tau_p} t.$$

Якщо імпульс сил інерції відповідає приведеному виразу, то його слід розглядати як оптимальний при реалізації закону зміни прискорення в часі. При заданих параметрах несучої системи верстата про плавність реверсування можна судити по відхиленню закону зміни прискорення від оптимального. На основі вищевказаного виразу можна визначити, як буде змінюватись швидкість столу:

$$v = R \left(\frac{1}{2} t + \frac{\tau_1}{4\pi} \sin \frac{2\pi}{\tau_1} t \right).$$

Дані досліджень і багаторічний досвід проектування плоскошліфувальних верстатів в ОАО «Одеське СКБ спеціальних верстатів» дозволили створити широкодіапазонний цифровий електрогідравлічний привод подачі столу з оперативним мікропроцесорним пристроєм ЧПК [2]. У привод входить вузол керування типу Г69-4 із задаючим кроковим електродвигуном ШД-5Д1М. Закон зміни прискорення в часі і вибір максимальної величини прискорення при реверсуванні повинні бути пов'язані з можливостями крокового двигуна і його електричної системи керування.

Для перевірки результатів теоретичних положень проводились дослідження електрогідравлічного приводу подачі на плоскошліфувальному верстаті 3Д722. Розміщення на столі верстата датчика прискорення допомогла виявити взаємозв'язок між змінами тиску насоса, швидкістю столу і силами інерції, що діють при реверсуванні (рис. 2).

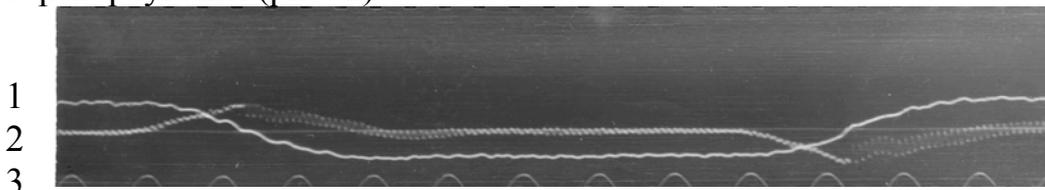


Рис. 2. Приклад запису сигналів датчиків швидкості (1) і прискорення (2) столу верстата (3 – відмітки часу).

Експериментальні дослідження показали, що запропонований електрогід-

равлічний привод дозволяє забезпечити автоматичний цикл шліфування з необхідними параметрами реверсування.

Література: 1. Детали и механизмы металлорежущих станков. Том 1 / Под ред. Д.Н. Решетова. – М.: Машиностроение, 1972. – 664 с. 2. Менакер П.С., Тихенко В.Н. Разработка и исследование гидропривода профилешлифовального станка // Вісник Сумського держ. у-ту. – Суми. 2003, №13(59). – С. 10 – 14.

УДК 621.941

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПРИПУСКА ПО УСЛОВИЮ МИНИМУМА УДЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

Яровой Ю.В. (Одесса, Украина)

Is substantiated prior distribution allowance on the condition of minimum specific work of formation.

В технологии машиностроения задача распределения припуска является актуальной и решалась многими исследователями. Большинство работ посвящены распределению припуска на окончательных операциях технологического процесса, а именно на операциях шлифования. Так как необходимо получить деталь заданного качества.

Задача распределения предварительного припуска по удельной работе формообразования не решалась не одним из исследователей.

Удельная работа формообразования определяется по следующему выражению:

$$e = \frac{N}{stv}, \quad (1)$$

где N – мощность резания, кВт; s – подача, мм/об; t – глубина резания, мм; v – скорость резания, м/мин.

Выражение (1) позволяет рассчитать удельную работу формообразования технологического перехода или операции. Для совокупности технологических переходов в операции или рабочих ходов в переходе справедливо выражение

$$e_{\Sigma} = e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_n = \sum_{i=0}^n e_i, \quad (2)$$

где e_{Σ} – соответственно суммарная удельная работа формообразования; $e_1, e_2, e_3, \dots, e_n$ – удельная работа формообразования каждого технологического перехода (рабочего хода) из которых состоит технологическая операция (переход).

Выражение (2) справедливо также для анализа суммарной удельной работы резания для разработанного технологического маршрута обработки детали. В этом случае составляющие выражения представляют собой удельную работу резания каждой технологической операции. Данное выражение позволяет перейти от параметрической оптимизации отдельных рабочих ходов к структурной оптимизации элементов технологического процесса. Это дает возможность количественно сравнивать между собой различные способы формообразования поверхностей деталей машин.

С целью повышения производительности и сокращения потерь энергии на вспомогательные ходы необходимо стремиться удалять предварительный одно-

сторонний припуск за один рабочий ход. Если по каким-либо причинам (наличие литейной корки, ковочных напусков, завышенных припусков) реализовать это затруднительно ввиду недостаточной жесткости технологической системы, необходимо осуществлять несколько последовательных смежных рабочих ходов. В этом случае условие $e_{\Sigma} \rightarrow \min$ будет выполняться лишь при энергетически обоснованном распределении общего припуска между рабочими ходами.

Используя формулы, приведенные в справочной литературе, выражение (1) представим в качестве целевой функции, которая зависит от режимов формообразования и имеет вид

$$e = Ct^{x-1}s^{y-1}v^n, \quad (3)$$

где C – постоянная; x, y, n – показатели степени.

Согласно выражению (2) суммарная удельная работа двух рабочих ходов запишется в виде

$$e_{1,2} = e_1 + e_2 = Ct_1^{x-1}s_1^{y-1}v_1^n + Ct_2^{x-1}s_2^{y-1}v_2^n. \quad (4)$$

Аргументы функции удовлетворяют уравнению

$$z = t_1 + t_2, \quad (5)$$

где z – общий припуск на выполнение первого и второго рабочего хода (технологического перехода).

Для поиска оптимального значения распределения глубины резания на первом рабочем ходе (технологическом переходе) выражение (4) должно удовлетворять следующему условию: функция $e_{1,2} = f(t)$ определима и дифференцируемая на отрезке $[0; z]$. Поиск экстремума функции проводим по методу множителей Лагранжа. Определив частные производные функции Лагранжа, решаем систему уравнений, которая имеет вид:

$$\begin{cases} C(x-1)t_1^{x-2}s_1^{y-1}v_1^n + \lambda = 0 \\ C(x-1)t_2^{x-2}s_2^{y-1}v_2^n + \lambda = 0 \\ t_1 + t_2 = z \end{cases} \quad (6)$$

Решив данную систему уравнений, получаем модель энергетически обоснованного распределения припуска:

$$t_1 = \frac{z}{1 + \left(\frac{v_2^n \cdot s_2^{y-1}}{v_1^n \cdot s_1^{y-1}} \right)^{\frac{1}{x-2}}}, \quad (7)$$

Выражение (7) имеет общий вид для всех операций лезвийной обработки. Подставляя в нее значения показателей степеней, приведенных в справочной литературе, получаем выражение для определения глубины резания на первом рабочем ходе (технологическом переходе).

В частном случае, когда при выполнении технологических переходов (рабочих ходов) скорость резания и подача остаются постоянными ($v_1 = v_2, s_1 = s_2$), распределение припуска имеет вид $t_1 = t_2 = 0,5z$.

Изменяя технологические параметры обработки, можно найти такое распределение припусков, которое обеспечит минимальную удельную работу на каждом из этапов обработки.

УДК 621.923/621

**СПОСОБ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ
ПОГРЕШНОСТИ ШАГА РЕЗЬБЫ ПРИ МНОГОПРОХОДНОМ
ШЛИФОВАНИИ ХОДОВЫХ ВИНТОВ ПЕРЕДАЧИ ВГК**

Замрий К.Ю., магистрант, **Соколов В.Ф.**, канд. техн. наук
(г. Одеса, Украина)

Method of stabilization of temperature making error of step of screw-thread at the multipass polishing of feed-screws of marbles helical gear.

При обработке ходовых винтов передачи ВГК на точность резьбошлифования оказывают влияние случайные факторы, в частности осевые температурные деформации. Осевые деформации влияют на качество поверхности обрабатываемых деталей, так как обуславливают смещение профиля шлифовального круга относительно профиля шлифуемой резьбы, что повышает вероятность появления прижога на боковых стенках профиля резьбы. Поэтому для получения качественных винтов необходимо обеспечение точности резьбошлифовального станка (РШС) и нужно использовать рациональный технологический процесс финишного резьбошлифования.

Для повышения стабильности технологического процесса резьбошлифования модели РШС оснащаются системами ЧПУ, позволяющими запрограммировать рабочий цикл резьбошлифования. В этом случае исключается влияние субъективных факторов на качество обработки, вследствие чего увеличивается производительность обработки и точность шага резьбы. Однако опытная эксплуатация РШС с ЧПУ на Одесском заводе прецизионных станков „Микрон“, показала, что даже на автоматизированных станках не удастся обеспечить стабильность шага резьбы, особенно для винтов второго и первого классов точности. Например винты 63×10 мм с длиной резьбовой части 1200 мм после обработки имели колебание накопленной погрешности шага от 13 до 38 мкм, что обусловлено влиянием температурной составляющей.

На практике существует несколько способов повышения точности финишного резьбошлифования, например, в работе [1] описан способ, в соответствии, с которым после каждого перехода измеряют температурные удлинения обрабатываемого винта и ходового винта станка. Разность этих удлинений вносят в настройку коррекционной линейки. Этот способ учитывает случайные изменения длины обрабатываемой детали и ходового винта станка, вызванное технологией обработки и температурными условиями в цехе. Однако этот имеет существенный недостаток. При перестройке коррекционной линейки образуется дополнительная погрешность. Эта погрешность может быть принята равной 0,5 длины шкалы (шкала деления 0,002 мм на 100 мм) нанесенной на столе РШС.

Например, для станка МВ-164 погрешность переустановки $\Delta = 0,001 \frac{l_p}{100}$

где l_p – длина резьбовой части винта. Таким образом, при шлифовании прецизионных ходовых винтов высоких классов точности использование этого метода компенсации температурных погрешностей ограничено.

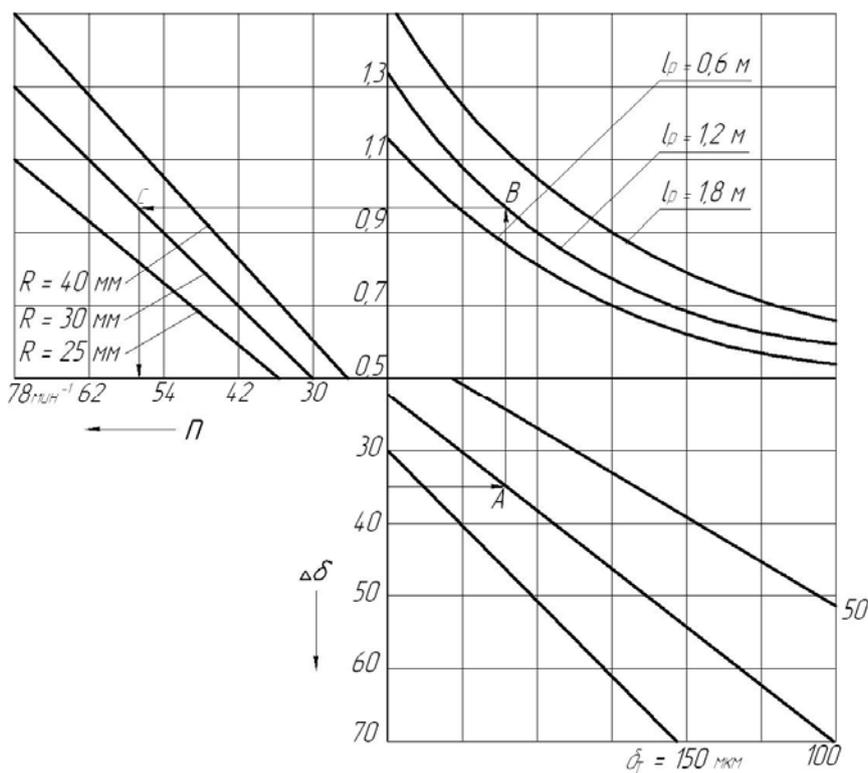


Рис. 1. Номограмма для определения скорости обратного хода стола станка.

В работе [2] предложен способ компенсации температурной составляющей за счет управления режимами резбошлифования (обороты детали) на основе использования математической модели, запрограммированной в микрокомпьютерной системе (управляющая микроЭВМ). Недостатком способа является необходимость оснащения дополнительной управляющей системой и ее сопряжение с системой ЧПУ станка.

Существует способ повышения точности

резбошлифования за счет изменения времени охлаждения заготовки на обратном ходу стола при неизменном положении коррекционной линейки. С технологической точки зрения скорость обратного хода стола является наиболее удобным параметром для оперативного управления температурными деформациями, т. к. она оказывает непосредственное влияние на охлаждение заготовки. Температура СОЖ также оказывает влияние на величину температурных деформаций. Способ позволяет повысить производительность за счет совмещения времени охлаждения с временем обратного хода стола станка в исходное положение, который производят при подаче СОЖ на заготовку.

$$\frac{V_0}{10^{-2} i \tilde{n}^{-1}}$$

Задача заключалась в установлении требуемого времени охлаждения детали с тем чтобы скомпенсировать губительное удлинение винта.

Время охлаждения устанавливалось путем изменения скорости обратного хода стола станка. При использовании метода необходимым условием является следующее положение: температурные деформации заготовки к моменту следующего перехода должны быть больше, либо равны соответствующей величины настройки коррекционной линейки.

Математическая модель, разработанная на основе управления теплового баланса заготовки в промежутках времени между переходами имеет вид:

$$Q_n - Q_m - Q_v = Q_T \quad (1)$$

где Q_i - количество тепла, полученное заготовкой к моменту окончания по-

следнего перехода, Дж; $Q_i, Q\hat{a}$ - количество тепла, отдаваемое заготовкой путем теплообмена, Дж; Q_o - количество тепла, учитывающее температурную деформацию заготовки, в соответствии с которой произведена настройка кинематической цепи, Дж.

Соответствующие формулы рассчитываются следующим образом:

$$Q_n = C\gamma \left(\frac{\delta_n}{\gamma + l_p} \right) \pi R^2 l_p, \quad (2)$$

$$Q_m = C\gamma \left(\frac{\delta_m}{\gamma + l_p} \right) \pi R^2 l_p, \quad (3)$$

$$Q_m = 2\alpha\pi R l_0 \left[T_o T_c \left(e^{-\frac{\tau_1}{T_c}} - e^{-\frac{\tau_2}{T_c}} \right) + \Delta T_m \frac{l_p}{V_o} \right]. \quad (4)$$

Подставляя зависимости (2), (3) и (4) в (1) было получено выражение:

$$\Delta\delta = \frac{2\alpha l_o \left[l_p \gamma_m \Delta T_m + \frac{V_o \delta_n \exp\left(-\frac{K}{V_p}\right)}{V_p \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{K}{V_p}\right) \right\}} \right] \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{K}{V_o}\right) \right\}}{C\gamma R V_o - \alpha_1 (l_p - l_o)} + \frac{2\alpha_1 \delta_m (l_p - l_o)}{C\gamma R V_o} \quad (5)$$

Из выражения (5) была построена номограмма (рис. 1) для определения числа оборотов заготовки при перемещении стола станка.

Литература: 1. Способ компенсации погрешности резьбы: А.С. 891221 СССР: МКИ³ В23В 1/00. 2. В.П. Ларшин Б.О. Ткаченко. Диагностика технологической операции финишного резьбошлифования на основе микро ЭВМ // Вестник машиностроения. – 1992. №3 – с. 58-61.

УДК 621.923

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ШЛИФОВАНИЯ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ

Малыхин В.В., канд. техн. наук, **Новиков С.Г.** канд. техн. наук
(г. Курск, Россия),

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, **Новиков Г.В.**, канд. техн. наук
(г. Харьков, Украина)

In the paper the conditions for improving the efficiency of diamond grinding circles at the metallic bonding.

Процессы абразивной и алмазной обработки играют ключевую роль в обеспечении качества, точности, надежности и долговечности выпускаемой машиностроением продукции. Одним из наиболее прогрессивных способов окончательной обработки деталей является алмазное шлифование, а среди его разновидностей наиболее перспективны – алмазно-искровое и алмазно-

электроэрозионное шлифование (АИШ и АЭШ).

Данные процессы позволяют расширить область их использования алмазных кругов на металлических связках. Представляет интерес выполнить оценку работоспособности кругов с точки зрения энергоемкости процесса и прочности удержания алмазных зерен в связке. С этой целью были выполнены эксперименты по алмазному шлифованию и АЭШ твердых сплавов Т15К6 и ТН-20 кругом 12А2-45 АС6 100/80 М1-01-4. Шлифование выполнялось по упругой схеме и исследовалось влияние длительности шлифования, нормального давления P_n , толщины среза a_z на показатели энергоемкости АШ и АЭШ: условное напряжение резания σ , коэффициент шлифования $K_{ш}$, коэффициент трения f , угол удаления алмазного зерна из связки α_{max} .

Общеизвестно, что энергоемкость процесса шлифования зависит от соотношения работ, которые затрачиваются на резание и трение. Для разработки эффективных путей совершенствования процесса алмазного шлифования важно знать доли энергий, затрачиваемых на резание и трение в общем энергетическом балансе обработки. Необходимость такой оценки связана с тем, что традиционно процесс шлифования рассматривается с позиций общей теории резания без отдельного учета доли энергии резания и трения. Это приводит к дисбалансу подводимой и отводимой при шлифовании энергии и не позволяет объективно оценить физические закономерности процесса шлифования. В работе [1] предлагается определить коэффициент «чистого резания» $K_{ш.рез}$ (аналогичный коэффициенту шлифования $K_{ш}$) и коэффициент трения f алмазного круга с обрабатываемым материалом следующим образом:

$$K_{ш.рез} = \sqrt{2\sigma_{сж} \frac{K_{ш}}{\sigma}}, f = K_{ш} - K_{ш.рез}, \quad (1)$$

где $\sigma_{сж}$ - предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²; σ - условное напряжение резания при шлифовании, Н/м².

Как известно, коэффициент шлифования $K_{ш}$ равен:

$$K_{ш} = \frac{P_z}{P_y}. \quad (2)$$

Тогда тангенциальную составляющую силу резания с учетом формул (1) и (2) можно определить

$$P_{z.рез} = K_{ш.рез} \times P_y \quad (3)$$

$$P_{z.тр} = P_z - P_{z.рез}, \quad (4)$$

где P_y – радиальная составляющая силы резания, Н; $P_{z.рез}$, $P_{z.тр}$ – составляющие силы P_z , обусловленные процессами резания и трения при шлифовании, Н.

Доля трения в общем энергетическом балансе процесса шлифования равна отношению коэффициента трения к коэффициенту шлифования. На основе экспериментальных значений параметров σ и $K_{ш}$, приведенных в табл. 1, можно оценить доли энергетических затрат на резание и трение при алмазном шлифовании (АШ) и алмазно-электроэрозионном шлифовании (АЭШ) $P_{но} = 1$ МПа, $V_{кр} = 20$ м/с.

Таблица 1

Экспериментальные значения параметров σ и $K_{ш}$

Продолжительность обработки, мин	$\sigma \cdot 10^4$, МПа		$K_{ш}$	
	Метод шлифования			
	АШ	АЭШ	АШ	АЭШ
2	13,8	6,2	0,42	0,26
4	14,4	7,4	0,34	0,24
6	14,8	8,4	0,28	0,23
8	15,3	8,3	0,26	0,23
10	15,7	8,5	0,24	0,24
12	16,0	8,4	0,23	0,23
14	16,4	8,5	0,21	0,23

С использованием формул (1) – (4) получены расчетные значения показателей энергоемкости, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные значения параметров

Длительность обработки, мин	α max		Кш		f		f/Кш, %		η	
	Метод шлифования									
	АШ	АЭШ	АШ	АЭШ	АШ	АЭШ	АШ	АЭШ	АШ	АЭШ
2	25,6	42	0,156	0,183	0,264	0,07	62,8	29,6	0,751	0,66
4	31,5	42,4	0,137	0,162	0,203	0,078	59,6	32,7	0,809	0,732
6	36,4	42,7	0,123	0,148	0,157	0,082	56,0	35,7	0,822	0,776
8	38	42,72	0,117	0,149	0,143	0,081	55,2	35,3	0,855	0,773
10	69,7	71,8	0,11	0,15	0,129	0,089	53,9	37,3	0,878	0,77
12	70,6	72,7	0,107	0,148	0,122	0,082	53,3	35,7	6,881	0,776
14	72,3	72,6	0,101	6,147	0,109	0,083	51,8	36,0	0,894	0,78

При АШ за 14 мин шлифования коэффициент трения f изменился от 0,264 до 0,109.

При алмазно-искровом шлифовании в результате частичного сгорания образующихся стружек и продуктов обработки практически исключается контакт обрабатываемого материала со связкой круга. При этих условиях доля энергетических затрат на трение и коэффициент трения f уменьшаются практически вдвое по сравнению с обычным алмазным шлифованием. При непрерывном поддержании режущей способности круга увеличивается также параметр $K_{шрез}$. При создании на рабочей поверхности круга острого режущего рельефа уменьшается параметр η , увеличивается производительность обработки и уменьшается теплонапряженность процесса шлифования. При алмазно-искровом шлифовании параметр η меньше, а параметр $K_{шрез}$ больше, чем при обычном алмазном шлифовании.

Нормальное давление P_n неоднозначно влияет на распределение энергетического баланса работ, который затрачивается на резание и трение. Например, при увеличении P_n от 0,2 до 0,8 МПа (табл. 3) доля энергии, затрачиваемой на трение

$f/K_{ш}$, уменьшается от 27 до 24,2%, а при увеличении P_n в интервале 0,8... 1,2 МПа параметр $f/K_{ш}$ увеличивается от 24,2 до 35,8%. Доля энергетических затрат на резание, которая оценивается параметром $K_{шрез}$, наоборот, в интервале изменения $P_n = 0,2...0,8$ МПа увеличивается от 0,183 до 0,226, а в интервале $P_n = 0,8... 1,2$ МПа – уменьшается от 0,226 до 0,195. Это связано с тем, что при алмазно-искровом шлифовании при изменении P_n от 0,2 до 0,8 МПа коэффициент трения не изменяется. Значения коэффициента трения соответствуют условиям трения твердого сплава с алмазом ($f = 0,07...0,075$), а параметр $K_{шрез}$ с увеличением толщин срезов зернами увеличивается. При дальнейшем увеличении P_n доля трения увеличивается, и эффективность алмазно-искрового шлифования уменьшается. Это происходит по двум причинам. Во-первых, в контакт с обрабатываемым материалом вступает металлическая связка алмазного круга, а во-вторых, увеличиваются нагрузки, действующие на зерна и происходит их интенсивное затупление, увеличивается η и уменьшается $K_{шрез}$. Таким образом, существует оптимальное значение P_n , при котором обеспечивается наибольшая производительность обработки. Превышение P_n оптимального значения требует увеличения электрических параметров процесса. С увеличением интенсивности электроэрозионного воздействия на рабочую поверхность круга восстанавливается режущая способность зерен, снижаются доля энергии трения и параметр η , который характеризует затупление режущих зерен, увеличивается параметр $K_{шрез}$.

Таблица 3

Влияние нормального давления на работоспособность алмазных кругов

P_n	α_{max}	$\sigma \cdot 10^4$, МПа	$K_{ш}$	$K_{шрез}$	f	$f/K_{ш}$ %
0,2	42,4	6,0	0,250	0,183	0,067	27,0
0,4	40,6	5,2	0,280	0,208	0,072	25,9
0,8	39,5	4,7	0,300	0,226	0,074	24,2
1,0	38,2	5,5	0,305	0,210	0,094	30,9
1,2	37	6,5	0,310	0,195	0,115	35,8

Работоспособность алмазных кругов на металлических связках во многом зависит от геометрии и формы зерна, а также от условий удерживания и вырывания зерен из связки. В процессе шлифования отдельные алмазные зерна под действием силы резания могут изменять свое положение в связке от "утопания" в нее до разворота в ней на некоторый угол α , при максимальном значении которого они вырываются из связки. Зерно совершает сложное плоско - параллельное перемещение, одновременно утопая в связку и разворачиваясь относительно одной из опорных точек в связке. Ранее [2] была установлена зависимость $\alpha_{max} \geq \gamma - \arctg K_{ш}$, где γ - половина угла профиля при вершине зерна; $K_{ш}$ - коэффициент шлифования ($K_{ш} = P_z/P_y$). Представляет интерес выполнить количественную оценку величины α_{max} в зависимости от угла γ и коэффициента шлифования $K_{ш}$, которая позволит рекомендовать условия наилучшей работоспособности алмазных кругов. Для решения поставленной задачи воспользуемся значениями $K_{ш}$, полученными при микрорезании твердого сплава Т5К6 [2], а величину угла γ примем в диапазоне 40...80°, которые близки к реальным углам профиля алмазных зерен. Результаты расчета представлены в табл. 4.

Таблица 4

Влияние толщины среза a_z , коэффициента шлифования $K_{ш}$, половины угла профиля алмазного зерна γ на величину угла удаления зерна из связки α_{max}

a_z , мкм.	2	4	6	8	10	12	14
$K_{ш}$	0,35	0,44	0,51	0,57	0,6	0,65	0,68
α_{max}	$\gamma_1=80^\circ$	60,7	56,3	53	50,3	49	47
	$\gamma_2=600$	40,7	36,3	33	30,3	29	27
	$\gamma_3=400$	20,7	16,3	13	10,3	9	7

Условия резания и расчета: зерно АС50; скорость резания $V=20$ м/с; обрабатываемый материал Т15К6

Анализ полученных зависимостей показывает, что с увеличением толщины среза a_z , коэффициента шлифования $K_{ш}$ и уменьшении угла γ , угол вырывания зерна из связки α - уменьшается. Вместе с тем значения достаточно велики, что свидетельствует о прочном удержании алмазных зерен в органической связке. В реальных условиях алмазного шлифования твердых сплавов кругами на металлической связке значения $K_{ш}$ изменяются в пределах 0,19...0,24 при поперечной подаче $S_{non}=0,005...0,04$ мм/дв.ход [3]. Следовательно, даже при больших значениях толщин среза a_z , поперечной подачи S_{non} , угол α_{max} будет достаточно большим ($20^\circ...60^\circ$). Таким образом для повышения работоспособности алмазных кругов на металлических связках и производительности шлифования необходимо работать с большими толщинами среза и поперечной подачей $S_{non}=0,02...0,04$ мм/дв.ход.

Литература: 1. Новиков Г.В., Малыхин В.В. Оценка энергий, затрачиваемых на резание и трение в общем энергетическом балансе процессов алмазного и алмазно-искрового шлифования // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации [Текст]: материалы III Международной научно-технической конференции: в 2 ч. Ч. 2: Курск. гос. техн. ун-т. – Курск, 2005. – С. 138-143. 2. Новиков С.Г., Малыхин В.В. К вопросу физического моделирования шлифования алмазными кругами на органических связках // Труды 4-й международной научно-технической конференции «Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве», 23 - 24 октября 2001г. – Харьков, 2001. – С. 128 - 134. 3. Теоретические основы резания и шлифования материалов / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса.: ОПТУ, 1999. – 450 с.

УДК 621.923

ОБОСНОВАНИЕ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ФИНИШНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Новиков Г.В., канд. техн. наук, **Дитиненко С.А.** (г. Харьков, Украина)

In this paper we theoretically proved the main directions of improving the accuracy and performance of the finish machining.

При изготовлении ответственных деталей машин наиболее существенной проблемой по-прежнему остается проблема обеспечения высокой точности обрабатываемых поверхностей [1]. И это несмотря на то, что в производстве используются достаточно совершенные станки, инструменты, технологические процессы. Данная проблема обусловлена, прежде всего, наличием упругой си-

стемы станка – источника возникновения упругих перемещений и колебаний, вызывающих погрешности обработки. Исключить упругую систему станка из технологического процесса обработки практически невозможно. Поэтому основным путем повышения точности обработки следует рассматривать управление упругими перемещениями и колебаниями при обработке [2].

Общеизвестно, что упругое перемещение y технологической системы в радиальном направлении равно отношению радиальной составляющей силы резания P_y и приведенной жесткости системы c . Неограниченно уменьшая силу P_y , можно реализовать условие $y \rightarrow 0$. Однако это требует существенного уменьшения производительности обработки, что не всегда эффективно. В общем виде сила P_y аналитически описывается [1]:

$$P_y = \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot S, \quad (1)$$

где σ – условное напряжение резания, Н/м²; $K_{рез} = P_z / P_y$ – коэффициент резания; P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н; S – площадь поперечного сечения среза (для шлифования $S = Q / V_{кр}$; Q – производительность обработки, м³/с; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с).

Исходя из зависимости (1), уменьшить силу P_y без уменьшения параметра S (производительности обработки) можно уменьшением соотношения $\sigma / K_{рез}$, определяющего интенсивность силовой напряженности механической обработки. Данное соотношение связано с известным соотношением a_z / R обратно пропорциональной зависимостью, где a_z – толщина среза, м; R – радиус округления вершины режущего зерна (или режущего инструмента). Следовательно, чем больше a_z и меньше R , тем меньше соотношение $\sigma / K_{рез}$. Поскольку параметр a_z линейно связан с S , уменьшить силу P_y (без уменьшения S) можно уменьшением параметра R , обеспечивая высокую остроту режущего инструмента. Это достигается в первую очередь применением лезвийных и абразивных инструментов из синтетических сверхтвердых материалов, обладающих чрезвычайно высокой твердостью и износостойкостью.

Преобразуя зависимость (1), величину упругого перемещения y окончательно можно представить в виде

$$y = \frac{b}{c} \cdot (4 \cdot R \cdot HV)^{0,67} \cdot (a_z \cdot \tau_{сдв})^{0,33}, \quad (2)$$

где b – ширина резания, м; c – приведенная жесткость технологической системы, Н/м; $HV, \tau_{сдв}$ – соответственно твердость и предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала, Н/м².

Из зависимости (2) вытекают основные условия уменьшения величины y , состоящие в уменьшении параметров b, R, a_z и увеличении c . Наибольшее влияние на y оказывают параметры b и c . Однако, уменьшение параметров b

и a_z связано с уменьшением производительности обработки. Поэтому эффективно увеличивать c и уменьшать R , как отмечалось выше.

Радиус округления вершины режущего зерна R связан с линейной зависимостью с зернистостью абразивного или алмазного порошка, используемого при алмазно-абразивной обработке. Поэтому важнейшим условием повышения точности обработки необходимо рассматривать снижение зернистости, что подтверждается экспериментальными данными. Если все возможности уменьшения величины y за счет уменьшения параметров c и R исчерпаны, то необходимо уменьшить параметр b , затем a_z , т.к. b в значительно большей степени влияет на величину y , чем a_z .

При точении параметр b описывается зависимостью $b=t/\cos\varphi$, где t – глубина резания, м; φ – угол резца в плане. Следовательно, уменьшение b предполагает уменьшение глубины резания t . При этом важно, чтобы соотношение a_z/R было больше предельного значения, при котором резание неосуществимо, а возможно лишь упруго-пластическое деформирование обрабатываемого материала. Исходя из этого зависимость (2) может быть представлена

$$y = \frac{R \cdot b}{c} \cdot (4 \cdot HV)^{0,67} \cdot (\alpha \cdot \tau_{сдв})^{0,33}, \quad (3)$$

где $\alpha = a_z/R > 0,04$.

При заданном значении α уменьшить величину y можно уменьшением параметров R , b и увеличением c , которые в одинаковой степени влияют на y . При обеспечении наименьшего значения $R \cdot b/c$ зависимость (3) определяет минимально возможное значение y , достигаемое в процесс резания.

Из зависимости (2) вытекает, что решить проблему повышения точности обработки при одновременном обеспечении высокой производительности можно за счет уменьшения ширины среза b и увеличении толщины среза a_z , т.к. эти параметры с различной степенью входят в зависимость. Проведем анализ зависимости (2) для различных процессов алмазно-абразивной обработки. Очевидно, наименьшие значения параметров R и a_z можно достичь при обработке свободным абразивом или инструментом со связанным мелкозернистым абразивом, изготовленным гальваническим методом. Эти инструменты (шлифовальные круги) обеспечивают однослойное (одновысотное) расположение режущих зерен, чего не обеспечивают традиционные абразивные и алмазные круги. Кроме того, изготовить обычные круги мелкой зернистости весьма сложно, что ограничивает возможности уменьшения параметра R в зависимости (2).

Более высокие значения R при шлифовании требуют увеличения параметра a_z для обеспечения условия микрорезания $a_z/R = const$. Отсюда вытекает, что шлифование имеет существенные ограничения с точки зрения достижения высокой точности обработки. При этом следует иметь в виду то, что при шлифовании обрабатываемый материал контактирует со связкой круга, а это дополнительно увеличивает силу резания и величину упругого перемещения. Чтобы исключить (или уменьшить) нежелательное трение связки круга с обра-

батываемым материалом, на практике прибегают к различным средствам: применению эффективных технологических сред и методов правки круга, использованию связок круга, обеспечивающих режим его самозатачивания.

Важным резервом повышения эффективности шлифования является применение алмазных кругов на металлических связках. Эти круги за счет более прочного удержания зерен связки позволяют увеличить толщину единичного среза a_z . Это создает эффект снижения величины y при одновременном увеличении производительности обработки, согласно зависимости (2). Однако, как показывает практика, данные алмазные круги в процессе шлифования быстро затупляются и засаливаются и могут быть эффективно использованы при условии их непрерывной или периодической правки за счет использования алмазного электроэрозионного шлифования, основанного на введении в зону резания дополнительной электрической энергии в форме электрических разрядов.

Для оценки технологических возможностей этого перспективного метода обработки были проведены комплексные экспериментальные исследования алмазного электроэрозионного шлифования изделий из твердых сплавов на операциях плоского, круглого наружного и внутреннего шлифования. Наибольший эффект был достигнут при внутреннем шлифовании, которое характеризуется относительно низкой жесткостью технологической системы и быстрой потерей режущей способности алмазного круга на металлической связке, имеющего небольшую режущую поверхность. Например, при обычном шлифовании алмазным кругом на прочной металлической связке М2-01 в течение 8 минут производительность обработки уменьшилась в 5 раз. Введение в зону резания дополнительной электрической энергии постоянного тока позволило, во-первых, стабилизировать производительность во времени, во-вторых, добиться ее увеличения по сравнению с обычным шлифованием (без тока) и приблизить фактическое и номинальное значение. Этим удалось существенно уменьшить силу резания и упругие перемещения в технологической системе. Исходя из зависимости (1), уменьшение силы P_y произошло за счет уменьшения соотношения $\sigma / K_{рез}$, т.е. увеличения соотношения a_z / R .

Исходя из зависимости (3), уменьшение величины y произошло за счет повышения остроты режущих зерен круга, т.е. уменьшения радиуса их округления R . Увеличение коэффициента $\alpha = a_z / R$ в данном случае не привело к увеличению величины y , т.к. α входит в зависимость (3) с меньшей степенью, чем R .

На основе проведенных экспериментальных исследований установлено, что основной эффект алмазного электроэрозионного шлифования состоит в обеспечении своевременного удаления с рабочей поверхности круга затупившихся зерен и устранении трения металлической связки круга с обрабатываемым материалом. Это создает условия уменьшения силовой напряженности процесса и повышения производительности и точности обработки. Разработанные технологии алмазного электроэрозионного шлифования твердосплавных инструментов и других изделий [3], а также технологии алмазно-абразивной

обработки используются на Харьковском машиностроительном заводе “ФЭД” и других предприятиях.

Литература: 1. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Серов Б.С., Якимов А.А. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с. 2. Новиков Г.В. Математическая модель формирования упругих перемещений при механической обработке. – Вісник НТУ”ХП”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХП”. – 2005. – № 24. – С. 149-157. 3. Новиков Г.В. Разработка прогрессивных высокопроизводительных технологий алмазного шлифования // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. –2007. – Вип. 61. – С. 222-230.

УДК 621.922.04

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ В ГОРЛОВИНАХ БАЛЛОНОВ

Иванов Е.И., канд. техн. наук, **Иванов И.Е.**, канд. техн. наук
(г. Мариуполь, Украина)

The analysis of precision machining of holes in the inlet tanks.

При изготовлении баллонов на автоматических линиях возникает ряд сложных задач по обеспечению точности обработки отверстий под коническую резьбу в горловинах баллонов [1]. Для решения данных задач важно теоретически оценить величину суммарной погрешности обработки и выявить доминирующую погрешность, что позволит вести целенаправленный поиск путей повышения точности обработки. В связи с этим, целью настоящей работы является анализ точности механической обработки отверстий в горловинах баллонов на основе базового технологического процесса.

В общем виде суммарная погрешность обработки складывается из следующих слагаемых:

$$\Delta_{обр.} = \Delta_y + \Delta_n + \Delta_c, \quad (1)$$

где Δ_y – погрешность установки заготовки при обработке; Δ_n – погрешность наладки технологической системы на размер; Δ_c – погрешность обработки, возникающая в результате смещения элементов технологической системы под действием сил резания.

Погрешность установки заготовок Δ_y вызывается колебанием размеров технологических баз, контактных деформаций установочных баз заготовки и приспособления, точностью изготовления приспособления и др. факторами. Погрешность Δ_n наладки технологической системы на выдерживаемый размер связана с точностной характеристикой применяемого метода наладки. Погрешность Δ_c обработки вызывается колебаниями упругих деформаций технологической системы под влиянием нестабильности сил резания.

На автоматической линии обработка производится путем последовательной передачи заготовки с одной рабочей позиции на другую, с автоматической фиксацией на каждой позиции. Таким образом, при обработке каждой заготовки участвуют приспособления всех рабочих позиций, а в каждом приспособлении устанавливаются все заготовки. Следовательно, погрешность установки становится случайной величиной, компенсировать которую настройкой не

представляется возможным. При этих условиях технологические базы заготовок искажаются, и погрешности обработки возрастают.

В общем случае погрешность установки заготовки Δ_y является функцией погрешности базирования Δ_b , погрешности закрепления Δ_z и погрешности приспособления Δ_{np} , т.е. $\Delta_y = f(\Delta_b; \Delta_z; \Delta_{np})$. Указанные погрешности являются случайными величинами, поэтому справедлива зависимость

$$\Delta_y = 1,2 \sqrt{\Delta_b^2 + \Delta_z^2 + \Delta_{np}^2} \quad (2)$$

Технологическими базами при обработке баллонов на первых трех операциях (центрирование торца горловины; сверление отверстия $\varnothing 22$ на глубину $L=30$ мм и подрезка торца горловины; точение пояска $\varnothing 50_{-0,9}$ с чистой подрезкой торца) служат сферическая часть горловины баллона $\varnothing 70$ мм. Установочным элементом приспособления является втулка с коническим отверстием. Можно представить, что базирование баллона осуществляется двумя самоцентрирующимися призмами (рис. 1). Погрешность базирования в радиальном направлении будет возникать в том

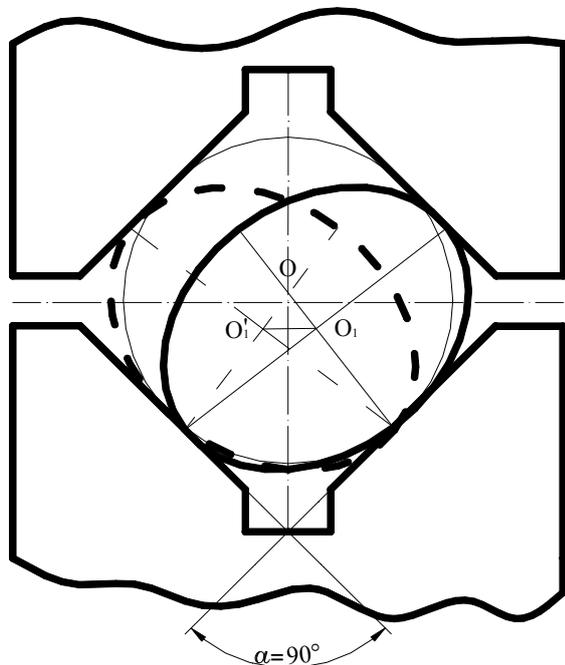


Рис. 1. Схема образования погрешности базирования на первой позиции.

случае, если имеется отклонение формы сферической поверхности баллона.

Величина наибольшего смещения оси заготовки баллона определяется расстоянием $O_1 O_1'$ и равна $\Delta_b = 2\Delta_\phi \sin \frac{\alpha}{2}$, где α – угол призмы; Δ_ϕ – погреш-

ность формы в поперечном сечении (овальность).

В качестве технологических баз на 4...5 позициях (зенкерование отверстия и нарезание резьбы метчиком) используются обработанная цилиндрическая поверхность и торец горловины баллона (рис. 2).

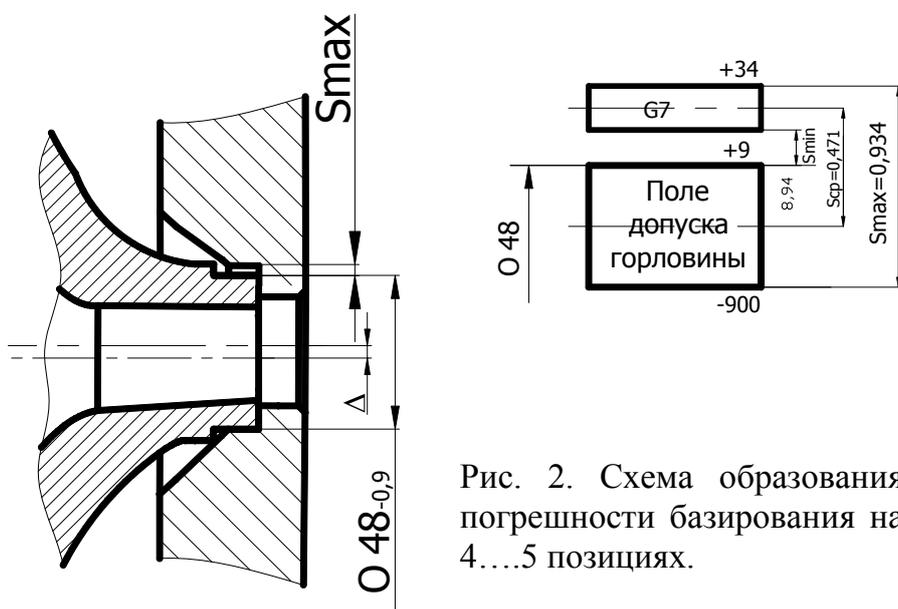


Рис. 2. Схема образования погрешности базирования на 4...5 позициях.

Погрешность закрепления Δ_3 зависит от конструкции зажимного устройства приспособления и направления усилия зажима. Т.к. направление зажимного усилия перпендикулярно к двойной направляющей базе, то погрешность закрепления связана с неточностью базирующих опорных поверхностей на заготовке и наличием контактных деформаций поверхностей стыка. Поле рассеяния, связанное с закреплением, можно принять по аналогии с закреплением в тисках, что составляет 0,05–0,2 мм [57].

Погрешность приспособления $\Delta_{пр}$ связана с погрешностью изготовления его установочных элементов, его износа и неточности установки приспособления на станке. Значения перечисленных погрешностей могут быть приняты в пределах 0,025–0,1 мм с учетом точности изготовления элементов приспособления (7–8 квалитеты) и его установки на станке (0,05–0,1 мм).

Погрешность наладки технологической системы на размер связана с методом установки заготовки в приспособлении. В нашем случае установка заготовки в приспособление осуществляется без выверки, что характерно для крупносерийного и массового производства при обработке деталей партиями с одной наладки. Погрешность наладки технологической системы на размер Δ_n включает погрешности регулирования $\Delta_{рег}$ положения режущего инструмента и погрешности измерения $\Delta_{изм}$ пробных замеров, по которым производится настройка станка: $\Delta_n = 1,2\sqrt{\Delta_{рег}^2 + \Delta_{изм}^2}$.

Погрешность положения режущего инструмента на станке определяется точностью используемых при настройке регулировочных средств и может быть принята равной цене деления мерительного инструмента. При использовании индикатора $\Delta_{рег} = 0,01–0,06$ мм, если настройка осуществляется по пробной детали – $\Delta_{рег} = 0,10–0,13$ мм. При сверлении и зенкерованием отверстия в горловине точность установки специального сверла и зенкера в коническом отверстии шпинделя определяется величиной радиального биения его относительно оси, которое регламентируется стандартом и не превышает $\Delta_{рег} = 0,005–0,02$ мм и может не учитываться.

Погрешность измерения $\Delta_{изм}$ размеров пробных деталей принимается равной предельной погрешности используемого измерительного инструмента. При измерении штангенциркулем с ценой деления 0,05 мм – $\Delta_{изм} = 0,09$ мм, при измерении микрометром – $\Delta_{изм} = 0,014$ мм.

Погрешности обработки Δ_c , связанные с упругими смещениями в технологической системе, происходят под влиянием неуравновешенных сил, возникающих при срезании неравномерного пропуща. Неравномерность пропуща на обработку вызывается тем, что ось отверстия заготовки, установленной для обработки данной позиции, не совпадает с осью инструмента. Наиболее податливым звеном технологической системы при обработке отверстия являются инструментальные наладки, состоящие из режущего и вспомогательного инструментов. При обработке горловины баллона операциями, на которых погрешности, связанные с упругими смещениями, имеют существенное значение, являются рассверливание и зенкерование отверстия под нарезание конической резьбы. На этих операциях используются осевые инструменты – спиральные сверла

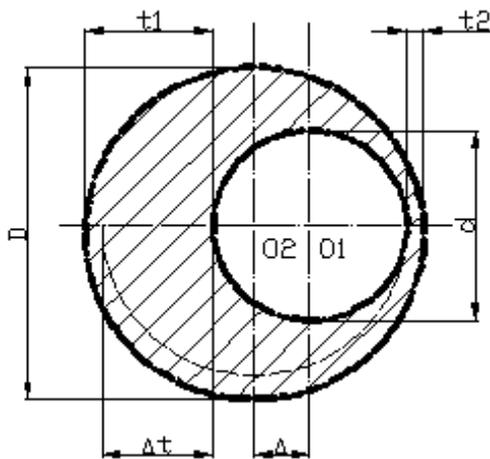


Рис. 3. Схема образования неравномерного припуска (D – диаметр обработанного отверстия; d – диаметр предварительно полученного отверстия; O_1 – ось отверстия в заготовке; O_2 – теоретическая ось обрабатываемого отверстия; Δ_0 – величина несовпадения осей; t_1 и t_2 – максимальная и минимальная глубина резания при обработке; Δt – изменение глубины резания при одном обороте инструмента).

силами на противоположных режущих лезвиях $\Delta P_\tau = P_{\tau 1} - P_{\tau 2}$.

Тангенциальные силы $P_{\tau 1}$ и $P_{\tau 2}$ могут быть определены из уравнений крутящего момента для каждого из лезвий, если принять, что эти силы приложены на периферии инструмента, т.е. плечо равно половине диаметра D :

$$M_1 = C_m \cdot D^q \cdot t_1^x \cdot S^y \cdot K_p; \quad M_2 = C_m \cdot D^q \cdot t_2^x \cdot S^y \cdot K_p; \quad P_{\tau 1} = \frac{2M_1}{D}; \quad P_{\tau 2} = \frac{2M_2}{D}.$$

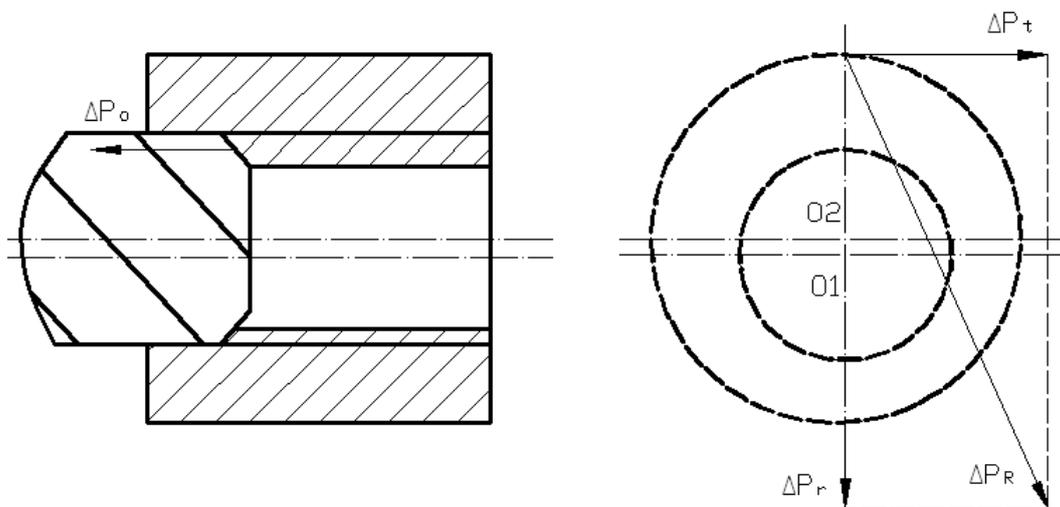


Рис. 4. Схема действия неуравновешенных сил: (ΔP_τ – неуравновешенная тангенциальная сила; ΔP_r – неуравновешенная радиальная сила; ΔP_R – равнодействующая неуравновешенных сил; ΔP_o – неуравновешенная осевая сила).

и конические зенкеры.

Рассмотрим упругие смещения осевого инструмента под влиянием неуравновешенных сил резания. Неуравновешенные силы резания возникают на зубьях инструмента при срезании неравномерного припуска, рис. 3.

Величина Δ_0 является смещением оси отверстия в заготовке относительно технологических баз, оставшимся от предшествующего технологического перехода. Изменение глубины резания при одном обороте инструмента $\Delta t = t_2 - t_1$ равно удвоенной величины смещения осей O_1 и O_2 : $\Delta t = 2 \cdot \Delta_0$. Тогда

$$t_1 = \frac{D-d}{2} + \Delta_0; \quad t_2 = \frac{D-d}{2} - \Delta_0. \quad (3)$$

Упругое отжатие инструмента Δ_c определяется из условий изгиба инструмента под действием неуравновешенных сил (рис. 4). Неуравновешенная тангенциальная сила резания ΔP_τ определяется как разность между тангенциальными

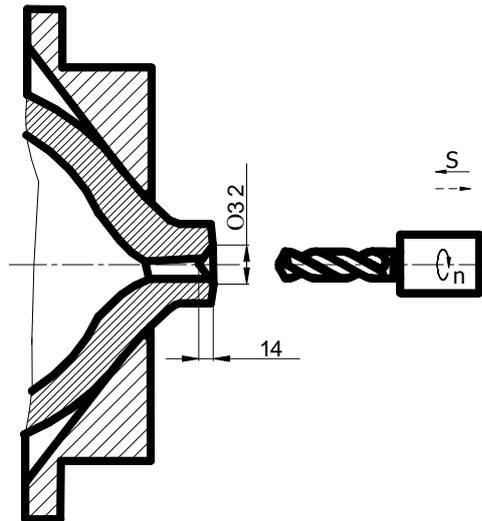
В этих формулах значения коэффициентов C_m и K_p , а также показателей степеней q , x , y – выбираются по соответствующим справочникам.

Неуравновешенная сила ΔP_τ определится $\Delta P_\tau = \frac{2}{D} C_m \cdot D^q \cdot S^y \cdot K_p (t_1 - t_2)^x$.

Вектор равнодействующей ΔP_R неуравновешенных сил, как показывают экспериментальные исследования, располагается под углом $\alpha = 41-45^\circ$ к плоскости смещения припуска. В этом случае величина неуравновешенной радиальной силы ΔP_r примерно равна тангенциальной ΔP_τ . Тогда

$$\Delta P_R = \sqrt{\Delta P_\tau^2 + \Delta P_r^2} = \Delta P_\tau \cdot \sqrt{2} \quad (4)$$

1 позиция.
Центрировать торец горловины.



Действие неуравновешенных сил ΔP_o учитываем коэффициентом $n=1,38 \div 1,42$. Упругое отжатие инструмента в концевом сечении определяем по формуле

$$\Delta_c = y = n \frac{P_R \cdot L^3}{3EJ}, \text{ где } EJ - \text{ изгибная жесткость инструмента; } E - \text{ модуль упругости материала инструмента; } L - \text{ длина вылета инструмента; } J = C_1 d^4 - \text{ осевой момент инерции формы поперечного сечения балки. Коэффициент } C_1 \text{ по опытным данным можно принимать для сверла } C_1=0,011, \text{ для зенкера } C_1=0,023, \text{ для развертки } C_1=0,030.$$

Произведем расчет суммарной погрешности обработки на позициях автоматической линии.

Рис. 5. Схема обработки горловины баллона на первой позиции.

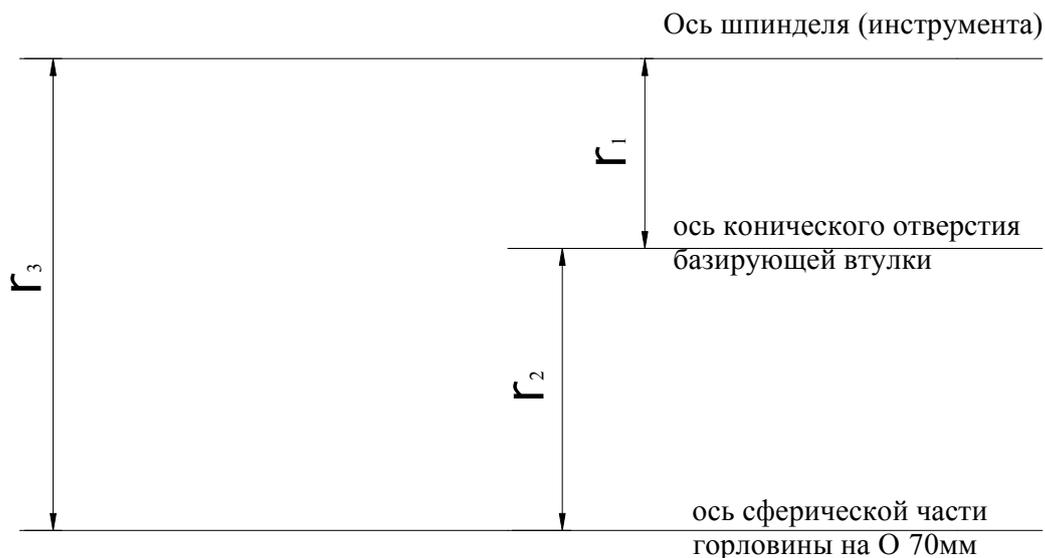


Рис. 6. Размерная цепь отклонений от соосности на первой позиции.

На рис. 6 показана размерная цепь отклонения от соосности на первой позиции, где r_1 – смещение оси конического отверстия базирующей втулки; r_2 – смещение оси сферической части горловины $\varnothing 70$ мм; r_3 – смещение оси отверстия $\varnothing 24$ мм. Исследованиями установлено, что величина отклонений от соос-

ности шпинделя силовой головки и оси обрабатываемого баллона находится в пределах от 0,6 до 2,8 мм. В регламенте по выполнению технологического процесса отсутствовало требование по регулярной юстировке оси шпинделя силовой головки и не имелось для этого специальных приспособлений. Перед проведением анализа точности базового технологического процесса эта погрешность была нами минимизирована до величины 0,2 мм с помощью разработанного приспособления. Погрешность установки $\Delta_y = 1,2\sqrt{\Delta_б^2 + \Delta_з^2 + \Delta_{np}^2}$. Погрешность базирования $\Delta_б = 2\Delta_\phi \sin \frac{\alpha}{2}$.

При диаметре баллона 219 мм и толщине стенки 7–10 мм допуск формы для заготовок, обкатанных на одношпиндельных обкатных машинах с учетом температурного интервала обкатки составляет $\Delta_\phi = 0,65$ мм. Принимая угол призмы $\alpha = 90^\circ$, получаем $\Delta_б = 2\Delta_\phi \sin \frac{\alpha}{2} = 0,91$ мм. Погрешность закрепления можно принять по аналогии с закреплением в тисках, т.е. $\Delta_з = 0,2$ мм.

Погрешность приспособления можно принять равной точности установки его на станке $\Delta_{np} = 0,1$ мм, тогда $\Delta_{y1} = 1,2\sqrt{0,9^2 + 0,2^2 + 0,1^2} = 0,93$ мм.

Погрешность наладки технологической системы $\Delta_n = 1,2\sqrt{\Delta_{peg}^2 + \Delta_{изм}^2}$.

Погрешность положения сверла при настройке определяется величиной радиального биения шпинделя станка относительно оси и, как указывалось выше, может не учитываться из-за малой величины. Погрешность измерения размеров пробных деталей штангенциркулем с ценой деления 0,05 мм составляет $\Delta_{изм} = 0,09$ мм. Таким образом, $\Delta_{n1} = 1,2\sqrt{0,09^2} = 0,11$ мм.

Упругие смещения сверла от оси – $\Delta_c = n \frac{\Delta P_R L^3}{3EJ}$. Принимаем $E = 2,1 \cdot 10^5$

МПа, вылет сверла $D=34$ мм в пределах трех диаметров, т.е. $L=100$ мм, момент инерции сечения сверла $J=0,011 \cdot D^4 = 14,699$ мм⁴, коэффициент $n=1,4$. Для расчета величины ΔP_R определяем изменение глубины резания $\Delta t = 2\Delta_0$. Величина Δ_0 является погрешностью установки Δ_{y1} и равна 0,93 мм, тогда $\Delta t = 2 \cdot 0,93 = 1,86$ мм.

Определяем $\Delta P_\tau = 10 \cdot \frac{2}{D} C_m \cdot D^q \cdot S^y \cdot K_p \cdot (\Delta t)^x \cdot 10^3$. Для условий обработки: $D = 34$ мм, $S = 0,3$ мм/об, $C_m = 0,09$, $q = 1$, $y = 0,8$, $x = 0,9$, $K_p = 1$, имеем $\Delta P_\tau = 1240$ Н; $\Delta P_R = \sqrt{2} \Delta P_\tau = \sqrt{2} \cdot 1240 = 1754$ Н. Окончательно

$\Delta_{c1} = 1,4 \frac{1754 \cdot 100^3}{3 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 14699} = 0,189$ мм. Тогда суммарная погрешность обработки

на 1-й позиции равна $\Delta_{обp1} = \Delta_{y1} + \Delta_{n1} + \Delta_{c1} = 0,93 + 0,11 + 0,189 = 1,23$ мм.

2 позиция. Сверлить отверстие Ø22 на глубину $L=30$ мм, подрезать торец горловины.

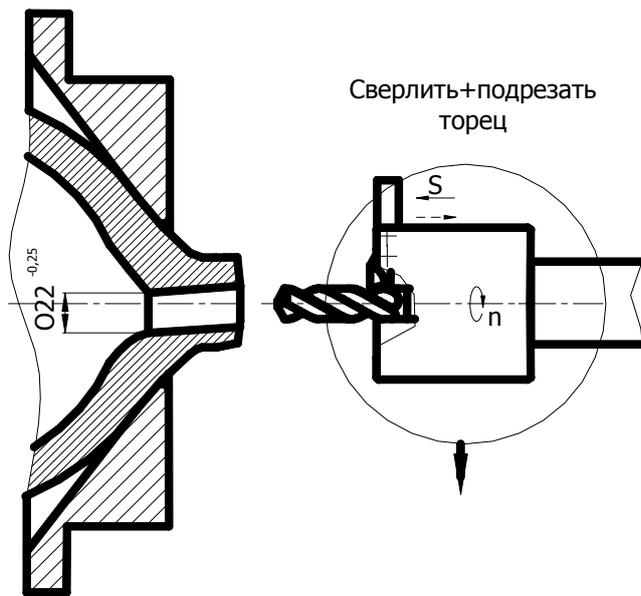


Рис. 7. Схема обработки горловины баллона на второй позиции.

сверла $J=0,011 \cdot 22^4 = 2577 \text{ мм}^4$, коэффициент $n = 1,4$, $\Delta_o = 0,93$, $\Delta t = 1,86 \text{ мм}$, получим

$$\Delta P_\tau = 10 \cdot \frac{2}{D} C_m \cdot D^q \cdot S^y \cdot K_p \cdot (\Delta t)^x \cdot 10^3 = \frac{2}{22} \cdot 0,09 \cdot 22 \cdot 0,28^{0,8} \cdot 1,86^{0,9} \cdot 10^3 = 1055,4 \text{ Н};$$

$$\Delta P_R = \sqrt{2} \Delta P_\tau = 303,3 \text{ Н} = 1492,5 \text{ Н}. \text{ Упругие смещения будут равны}$$

$$\Delta_{c2} = 1,4 \frac{1492,5 \cdot 65^3}{3 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 1257} = 0,7 \text{ мм}. \text{ Таким образом, суммарная погрешность обра-}$$

ботки на второй позиции обработки составляет

$$\Delta_{обр2} = \Delta_{y1} + \Delta_{н1} + \Delta_{c2} = 0,93 + 0,11 + 0,7 = 1,63 \text{ мм}.$$

3 позиция. Точить пояс $\text{Ø}50_{-0,9}$ с чистой подрезкой торца.

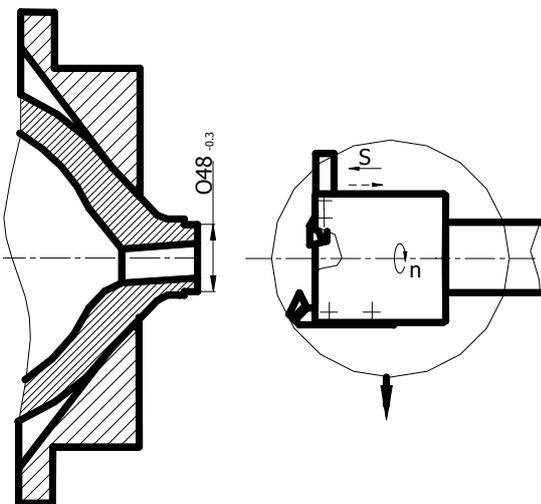


Рис. 8. Схема обработки горловины баллона на третьей позиции.

Погрешности, вносимые обработкой торца подрезным резцом, на радиальные погрешности влияют незначительно и ими можно пренебречь. Звенья размерной цепи для второй позиции будут иметь те же величины, что и для первой позиции, кроме величины Δ_c , связанной с жесткостью сверла из-за меньшего его диаметра. Упругие смещения сверла от оси составят

$$\Delta_{c2} = n \frac{\Delta P_R L^3}{3EJ}. \text{ Принимая}$$

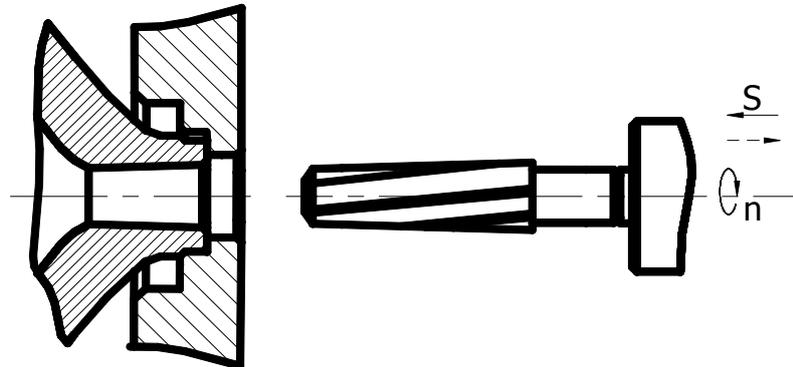
$E=2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, вылет сверла в пределах 3 диаметров, т.е. $L = 65 \text{ мм}$, момент инерции сечения

Величина погрешности установки Δ_y имеет ту же величину, что и в предыдущих позициях, т.к. схема базирования и зажима заготовки не меняется: $\Delta_{y3} = \Delta_{y2} = 1,89 \text{ мм}$.

Положение резцов в инструментальной наладке определяется путем настройки по пробным деталям. В этом случае погрешность регулирования составляет $\Delta_{рег} = 0,13 \text{ мм}$. Размеры диаметра обработанного пояса определяются с помощью штангенциркуля с ценой деления $0,05 \text{ мм}$, погрешность измерения составляет $\Delta_{изм} = 0,09 \text{ мм}$. Погрешность настройки технологической системы:

$$\Delta_{н3} = 1,2\sqrt{\Delta_{рез}^2 + \Delta_{изм}^2} = 1,2\sqrt{0,13^2 + 0,09^2} = 0,19 \text{ мм.}$$

4 позиция. Зенкеровать корпусное отверстие под резьбу.



Упругие перемещения резцов в инструментальной наладке под действием неуравновешенных сил резания связанных с неравномерным припуском, можно не учитывать в связи с достаточно большой жесткостью оправки и малыми вылетами инструмента, т.е. $\Delta_c=0$. В этом случае суммарная погрешность

Рис. 9. Схема обработки горловины баллона на четвертой позиции.

обработки составит $\Delta_{omp3} = \Delta_{y1} + \Delta_{н3} = 0,93 + 0,19 = 1,12 \text{ мм.}$



Рис. 10. Размерная цепь отклонений от соосности на четвёртой позиции.

На рис. 10 показана размерная цепь отклонения от соосности на четвёртой позиции, где r_1 – смещение оси цилиндрического отверстия базирующей втулки; r_2 – смещение оси цилиндрического пояса горловины $\varnothing 48 \text{ мм}$; r_3 – смещение оси отверстия в горловине; r_4 – смещение оси отверстия относительно оси шпинделя. Исследованиями установлено, что величина отклонений от соосности шпинделя силовой головки и оси обрабатываемого баллона находится в пределах от 0,6 до 2,8 мм. В регламенте по выполнению технологического процесса отсутствовало требование по регулярной юстировке оси шпинделя силовой головки и не имелось для этого специальных приспособлений. Перед проведением анализа точности базового технологического процесса эта погрешность была нами минимизирована до величины 0,2 мм с помощью разработанного приспособления. Погрешность установки $\Delta_{y4} = 1,2\sqrt{\Delta_6^2 + \Delta_3^2 + \Delta_{np}^2}$.

Погрешность базирования $\Delta_{\delta} = iT_1 + iT_2 + \Delta$.

Допуск на диаметр отверстия $\text{Ø}48\text{G}7$ составляет $48^{+0,034}_{+0,009}$, допуск на диаметр пояса горловины установлен $\text{Ø}48_{-0,9}$ мм. Тогда минимальный зазор составляет $\Delta=0,009$ мм, а погрешность базирования $\Delta_{\delta 4} = 0,025+0,9+2\cdot 0,009 = 0,943$ мм.

Погрешности закрепления заготовки и приспособления можно принять равными погрешностям при сверлении отверстия (позиция 2), т.е. $\Delta_{34}=0,2$ мм, $\Delta_{np4}=0,1$ мм, тогда $\Delta_{y4} = 1,2\sqrt{0,943^2 + 0,2^2 + 0,1^2} = 1,16$ мм. Погрешность наладки будет такой же, как и на позиции 1, т.е. $\Delta_{н4} = 0,11$ мм. Упругие смещения зенкера в связи с относительно небольшими сечениями среза можно не учитывать, т.е. $\Delta_c = 0$. В этом случае суммарная погрешность составит

$$\Delta_{обр4} = \Delta_{y4} + \Delta_{н4} = 1,16 + 0,11 = 1,27 \text{ мм.}$$

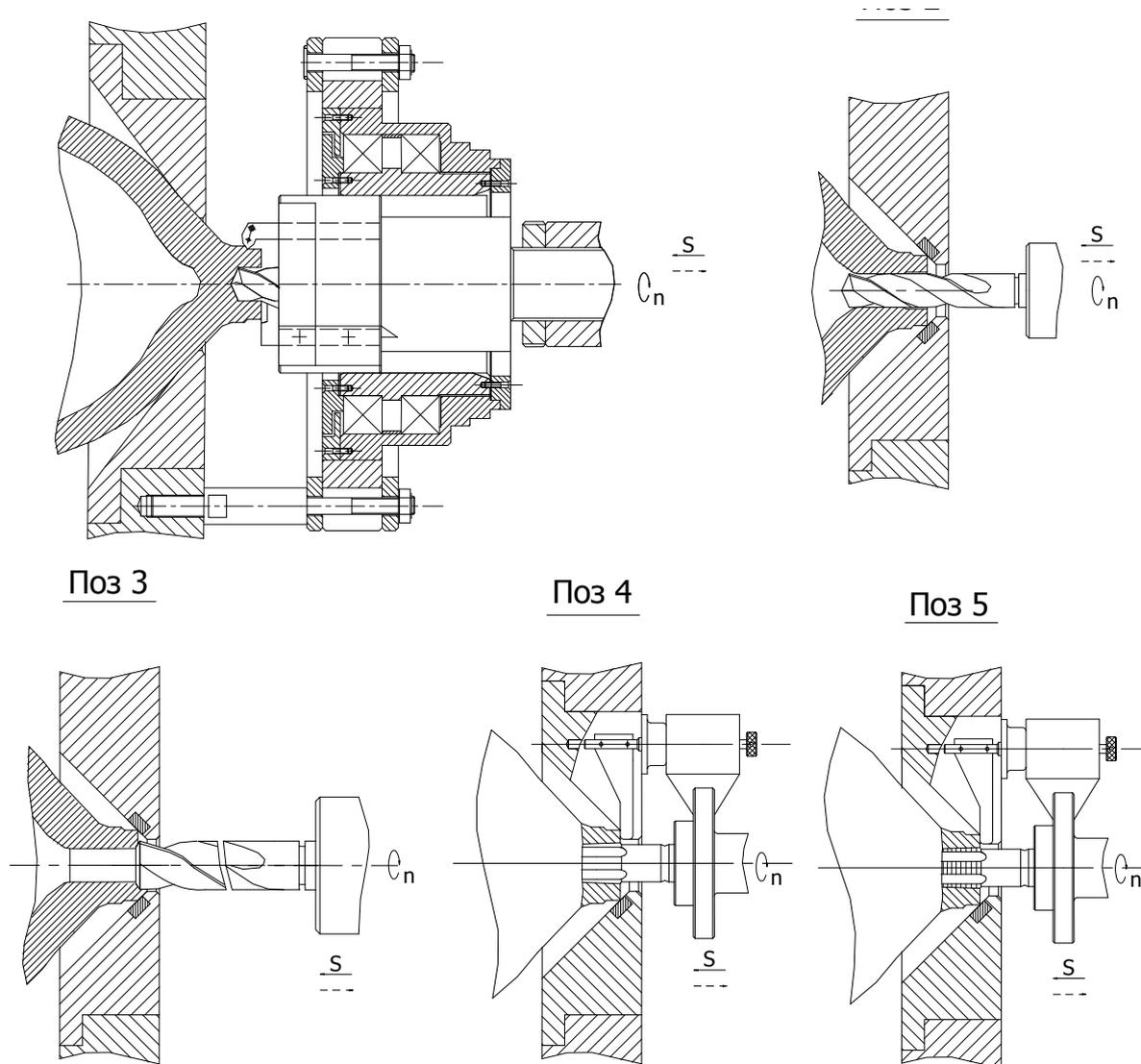


Рис. 11. Новый технологический процесс механической обработки резьбового отверстия в горловине баллона.

Полученные значения суммарной погрешности очень велики и в общем случае не обеспечивают требуемую надежность технологического процесса, что подтверждается большим процентом брака. Анализ результатов показыва-

ет, что доминирующей погрешностью является погрешность базирования, а остальные погрешности составляют 10–15 процентов суммарной погрешности. Таким образом, установлено, что принятые схемы базирования приводят к значительным погрешностям обработки отверстий. Поэтому достижение требуемой точности обработки возможно только при изменении схемы базирования баллона и увеличении жесткости и точности технологической системы. В связи с этим, нами был разработан новый технологический маршрут механической обработки с применением прогрессивной схемы базирования и способа корректировки рабочих ходов, специальных приспособлений и режущего инструмента, рис. 11 [1, 2, 3, 4].

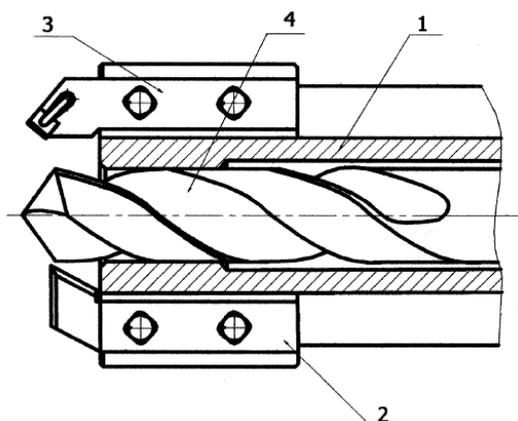


Рис. 12. Инструментальная головка: 1 – корпус; 2, 3 – подрезной и проходной резцы; 4 – сверло.

На первой позиции с целью повышения точности получаемых размеров, взаимного расположения поверхностей отверстия и наружного диаметра, а также формы обрабатываемых элементов была использована разработанная специальная инструментальная головка, осуществляющая одновременно сверление отверстия $\varnothing 24$ мм, подрезку торца и наружное обтачивание цилиндрической части горловины $\varnothing 48$ мм (рис. 12). Инструментальная головка представляет собой цилиндрический ступенчатый корпус с пазами

для крепления резцов со ступенчатым центральным отверстием для установки сверла. Концентрация переходов на первой позиции позволила значительно повысить производительность обработки и компенсировать погрешности базирования линейных размеров, соосности поверхностей отверстия и наружного диаметра, а также исключить отклонения от перпендикулярности торца горловины баллона относительно оси отверстия.

Предложена и реализована в условиях действующего производства принципиально новая схема базирования баллонов на протяжении всего технологического маршрута их механической обработки. Ее суть состоит в том, что после обработки от черновой базы цилиндрического пояска и торца горловины баллона (на первой позиции) образовавшуюся кромку принимаем за чистовую базу. Иными словами, для остальных позиций технологического процесса основной базой будет являться наружный диаметр горловины, обработанный на первой позиции. С целью материализации оси баллона предусмотрено использование базирующего конуса приспособления. Это позволило полностью ликвидировать погрешности базирования горловины баллона в радиальном направлении.

Выдержав требования по соосности оси отверстия и шпинделя станка, данная схема базирования вызывает смещение торца горловины баллона. Смещение определяется по зависимости: $\omega_l = Td / 2tg \frac{\alpha}{2}$, где Td – допуск наружно-

го диаметра горловины баллона, мм; α – угол базирующего конуса. Обеспечивая заданное значение Td , смещение будет изменяться в требуемых пределах.

Разработанный технологический процесс включает пять переходов. Столько же переходов включает и базовый технологический процесс. Однако, по содержанию переходы в двух рассматриваемых процессах различны. В разработанном технологическом процессе за счет применения специальной инструментальной головки (рис. 12) удалось произвести, по сути, концентрацию трех первых переходов базового технологического процесса в один переход. В результате чистовая технологическая база готовится сразу на первом переходе. Это позволило три последующих перехода (сверление, зенкерование и развертывание) подчинить только обработке отверстия с целью повышения его точности для обеспечения качественного нарезания конической резьбы. С этой точки зрения разработанный технологический процесс эффективнее базового, в котором, по сути, точность отверстия формируется лишь на переходе зенкерования. При таком подходе время обработки одного баллона в двух рассматриваемых технологических процессах приблизительно одно и то же, что важно для реализации технологического процесса обработки на высокопроизводительном оборудовании – автоматической линии – в условиях крупносерийного или массового производства.

Литература: 1. Иванов И.Е. Технологическое обеспечение точности и стабильности изготовления резьбовых отверстий в баллонах в условиях массового производства: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / И.Е. Иванов. – Мариуполь, 2008. – 20 с. 2. Иванов И.Е. Иванов Е.И. Разработка алгоритма анализа точности технологических процессов // Тезисы докладов XI региональной научно-технической конференции Приазовского государственного технического университета. – Мариуполь: ПГТУ, 2004. – С. 147 - 148. 3. Новиков Ф.В., Иванов И.Е. Повышение эффективности механической обработки высокоточного резьбового отверстия в горловине газового баллона // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2006. – Вып. 70. – С. 350-355. 4. Новиков Ф.В., Иванов И.Е. Технологическое обеспечение точности и стабильности изготовления внутренних герметических резьб в горловинах газовых баллонов в условиях крупносерийного и массового производства // Физические и компьютерные технологии. – Труды 12-й Международной научно-технической конференции, 7-8 июня 2006г. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2006. – С. 3-9.

УДК 621.81

УТОЧНЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ТЕРТЯ В ПРОЦЕСІ ФОРМОУТВОРЕННЯ НАВИВНИХ ЗАГОТОВОК

Лясота О.М., канд. техн. наук (м. Тернопіль, Україна)

The method of calculation of friction coefficients in the process of screw blank formation is suggested in the article according to the experimental investigation. The dependence to determine the given friction coefficient which allows to form the technological parameters of screw blank formation more precisely is deduced.

Сучасні технічні системи, що включають у свій склад гнучкі гвинтові заготовки (ГГЗ) висувають підвищені вимоги до їх якості і точності. При виготовленні ГГЗ методами деформування стрічкових або листових заготовок не завжди забезпечується необхідна точність їх зовнішніх і внутрішніх

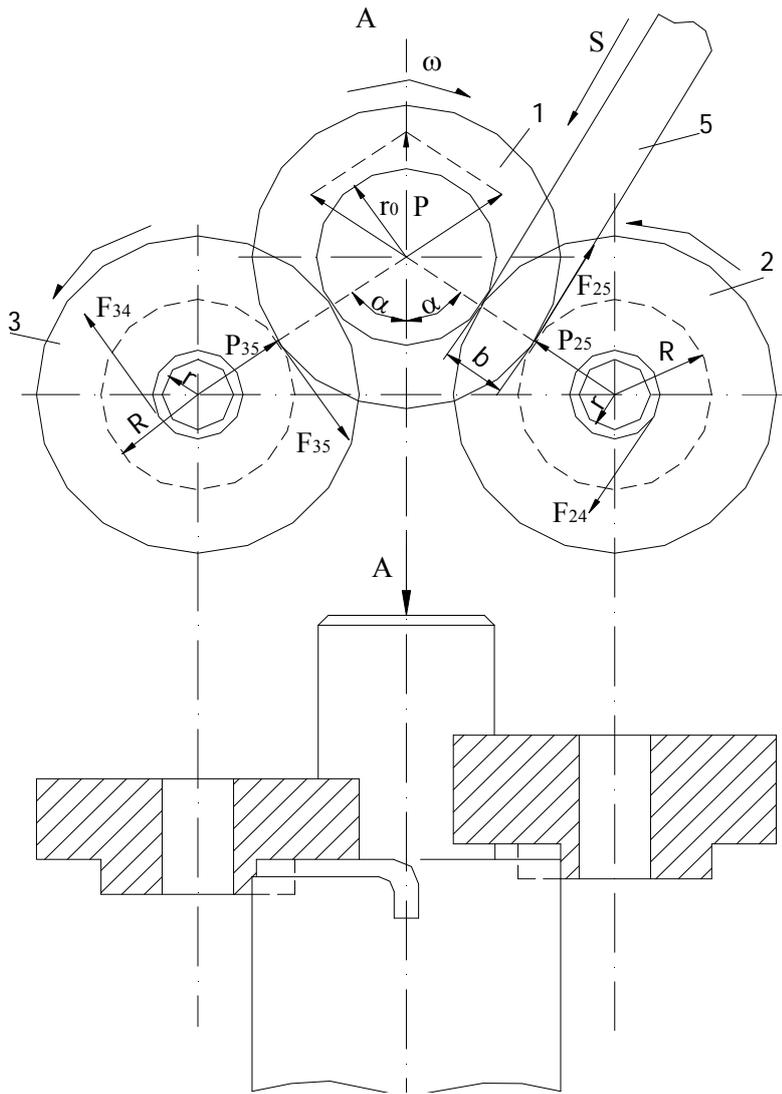


Рис. 1. Схема навивання гвинтової заготовки.

діаметрів, оскільки в процесі формоутворення заготовок діють фактори, які не завжди можна врахувати однозначно. Дослідження показали, що неоднозначно на процес формоутворення впливає тертя створюване формоутворювальними інструментами.

Навиваючи заготовку із стрічки на оправу навивна стрічка контактує з формоутворювальними роликами з радіусом R . Ролики обертаються на вісях у підшипниках ковзання, радіуси шийок яких рівні r_x (рис.1).

В початковій стадії навивний рух обертання оправы приймаємо рівномірноприскореним, тоді кут повороту φ можна визначити за формулою:

$$\varphi = \frac{\varepsilon \cdot t^2}{2} \quad (1)$$

де ε - кутове прискорення

оправы; t - час обертання оправы.

Швидкість оправы ω визначаємо за формулою:

$$\omega = \varepsilon \cdot t. \quad (2)$$

Встановивши із визначеного моменту час t і порахувавши кількість обертів n оправы, підставимо ці значення у формулу (1)

$$2\pi n = \frac{\varepsilon \cdot t^2}{2},$$

і визначимо звідси кутове прискорення:

$$\varepsilon = \frac{4\pi n}{t^2}. \quad (3)$$

Вимірявши за допомогою тахометра швидкість обертання оправы і час до стабільного обертання, кутове прискорення можна визначити за формулою (2)

$$\varepsilon = \frac{\omega}{t} = \frac{\pi n_1}{30t}, \quad (4)$$

де n_1 - число обертів оправы за тахометром.

Використавши основне рівняння динаміки обертового руху:

$$M = I\varepsilon \quad (5)$$

визначимо момент опору обертання оправи, для чого розглянемо сили, що діють в процесі формоутворення.

Сили тертя ковзання між формоутворюючими роликами і вісями на яких вони встановлені

$$F_{24} = F_{34} = f \cdot P \cdot \cos \alpha, \quad (6)$$

де f - коефіцієнт тертя ковзання в опорах роликів; P - сила притискування роликів до стрічки; α - половина кута між напрямками дії сил притискування.

Прирівнявши ці сили до робочої окружності формоутворювальних роликів за рівністю моментів:

$$\begin{aligned} F_{25}R &= F_{24}r \\ F_{35}R &= F_{34}r \end{aligned} \quad (7)$$

отримаємо

$$F_{25} = F_{35} = f \cdot P \frac{r}{R} \cos \alpha. \quad (8)$$

Тоді момент опору обертання оправи

$$M = (F_{25} + F_{35})R_0 + (P_{25} + P_{35})k, \quad (9)$$

де R_0 - радіус навивання, $R_0 = r_0 + b$; k - коефіцієнт тертя торців роликів до стрічки в процесі формоутворення.

Замінивши у формулі (9) значення F_{25} та F_{35} із формули (8), на P_{25} і P_{35} отримаємо:

$$M = 2PR_0 \cos \alpha \left(f \frac{r}{R} + \frac{k}{R_0} \right) \quad (10)$$

або, якщо прийняти, що вираз $2 \cos \alpha \left(f \frac{r}{R} + \frac{k}{R_0} \right)$ буде приведеним коефіцієнтом тертя $f_{i\delta}$ в зоні формоутворення, тоді

$$M = PR_0 f_{i\delta}. \quad (11)$$

Підставивши у формулу (5) значення \dot{I} з формули (11), а значення ε з формули (3) або (4) зможемо обрахувати приведений коефіцієнт:

$$f_{np} = \frac{4I\pi n}{PR_0 t^2} \quad (12)$$

або

$$f_{np} = \frac{I\pi n_1}{30PR_0 t^2}. \quad (13)$$

Виведена залежність для визначення приведенного коефіцієнта тертя формоутворювальних інструментів дозволяє більш точно формувати технологічні параметри процесу формоутворення ГГЗ.

К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ТОНКИХ СРЕЗОВ

Деревянченко А.Г., докт. техн. наук, Косс Е.В., канд. техн. наук,
Синьковский А.С., канд. техн. наук, Долищинский Р.Г., студент
(г. Одесса, Украина)

В условиях финишных операций лезвийной обработки (например, при тонком точении и растачивании) толщина срезаемого слоя становится соизмеримой с величиной радиуса округления режущей кромки (ρ).

В связи с износом режущего инструмента (РИ) и с появлением колебаний могут создаваться условия частичного прекращения процесса резания и стружкообразования в силу того, что толщина среза становится меньше минимально допустимой (a_{min}). Исследованию данного состояния системы резания (СР) посвящена обширная литература, в том числе [1]. При тонком точении резцом с переходной криволинейной режущей кромкой (РК) названное состояние СР имеет место в районе вершины резца (для нового РИ) и на различных участках РК (для изношенного РИ). Поскольку на современных станках, оснащенных системой прямого (или комбинированного) контроля состояний РИ, появляется возможность периодической оценки состояний РК и построения ее 2D или 3D текущих моделей [1] с оценкой комплекса параметров состояния РИ, представляют интерес экспериментальные исследования устойчивости процесса резания на округленной РК. В силу сложности получения оценок для РИ с криволинейной РК (в условиях несвободного резания) возникает необходимость получения предварительных данных при свободном резании. Это и явилось целью данной работы.

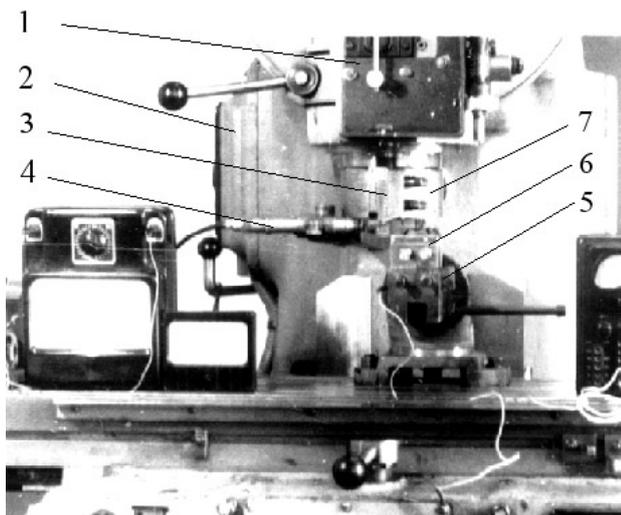


Рис. 1. Общий вид станда для моделирования процесса свободного резания в условиях тонких срезов (на столе станка представлены приборы, использовавшиеся для настройки положения вершины РИ относительно заготовки).

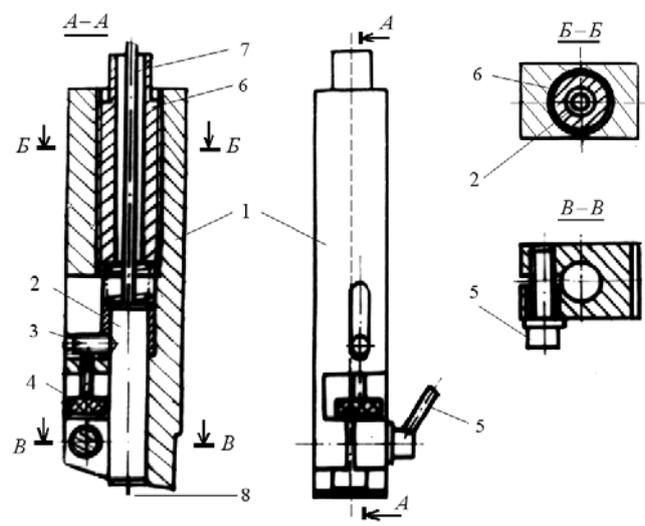


Рис. 2. Специальный резец для моделирования процесса свободного резания в условиях тонких срезов.

Моделирования процесса свободного резания в условиях тонких срезов производили с использованием станда, созданного на базе горизонтально – фрезерного станка (рис. 1). Шпиндель станка был застопорен; на нем крепилась специальная инструментальная головка со специальным резцом. Движение резания создавалось продольным перемещением стола станка, т.е. моделировался процесс строгания неподвижным резцом перемещающейся заготовки. Специальное устройство 1 для точного набора глубины строгания крепили на головке станка 2. Резец 3 устанавливали в инструментальной головке 7. Заготовка 6 (пластина, толщина которой меньше ширины резца), крепилась в специальных поворотных тисках 5, обеспечивающих возможность горизонтирования пластины (или наклона на угол μ) с точностью до $30'$. Датчик 4 контролировал степень отжатия резца. Материал резца – инструментальная сталь Р18. Геометрия резца: $\gamma = 0; \alpha = 9^0$. Стругание производили РИ с различными значениями округления РК ($\rho = 5 - 12 \text{ мкм}$). Величину ρ контролировали на специальном стенде, выполненном на базе профилографа – профилометра[1].

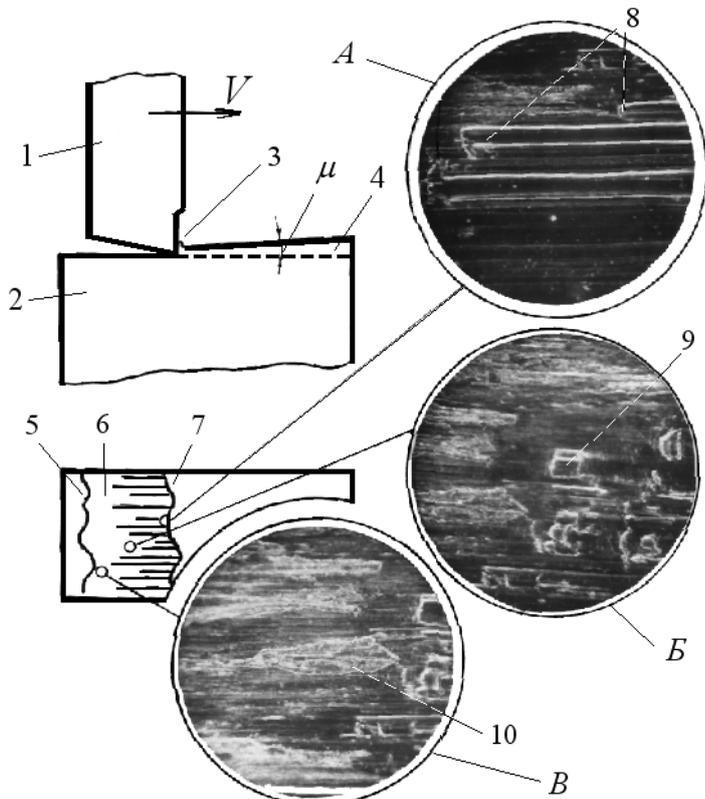


Рис. 3. Представление зоны врезания РИ с шероховатой РК в заготовку по схеме свободного резания с переменной толщиной среза.

среза. На рис 3 схематически представлена известная схема резания с переменной толщиной и фотографии трех участков поверхности заготовки в зоне врезания резца, полученные в одном из экспериментов. Приняты следующие обозначения позиций: 1 – резец; 2 – заготовка; 3 – микростружка; 4 – срезаемый слой; 5 – участок исходной поверхности заготовки; 6 – зона врезания, на которой отсутствует устойчивое резание шероховатой РК; 7 – зона устойчивого сре-

Для обеспечения точного набора глубины резания в корпус 1 специального резца (рис. 2) встраивали датчик перемещений 2, положение которого предварительно регулировали микровинтом 4 через штифт 3. Фиксацию датчика производили винтов с рукоятью 5. Через полую втулку 6 кабель 7 от датчика поступал к приборам настройки. Предварительно с использованием специальной мерной пластины вершина резца ”привязывалась” к шкале датчика 2. В начале пластины выполнялся скос, предохраняющий щуп 8 датчика от поломки.

Эксперименты проводили при резании с постоянной и переменной толщиной

зания стружки (на границе зон 6 и 7 формируется ”перфорированные”, лишенные целостности стружки, примеры которых показаны на рис. 4, 5); 8 – области перехода от пластического деформирования к резанию на отдельных участках РК; 9 и 10 – следы контакта участков РК с поверхностью заготовки в зоне 5; А, Б, В – фрагменты фотографий участков зоны 6, полученные на микроскопе МИМ – 7.

Очевидно, что длина зоны 6 в условиях эксперимента обусловлена величиной угла μ , а также параметрами текущего состояния РК (значениями ρ и шероховатостью РК). В условиях тонкого точения изношенным РИ подобное явление может наблюдаться вследствие формоизменений РК, связанных с появлением участков, на которых текущие значения главного угла в плане находятся в пределах $\varphi = 0 - 15^\circ$ [1].

Параллельно с исследованием зоны врезания РИ в заготовку производили фотографирование соответствующих тонких стружек (рис. 4, рис. 5). Это составило значительную трудность, т.к. часто такие стружки просто рассыпались от малейшей деформации. На рис.4 приняты обозначения: 1 и 2 – пустоты в стружке, 3 и 4 – участки сечения стружки на микрошлифах. Фрагменты сечений стружек увеличены по сравнению с основным видом стружки.

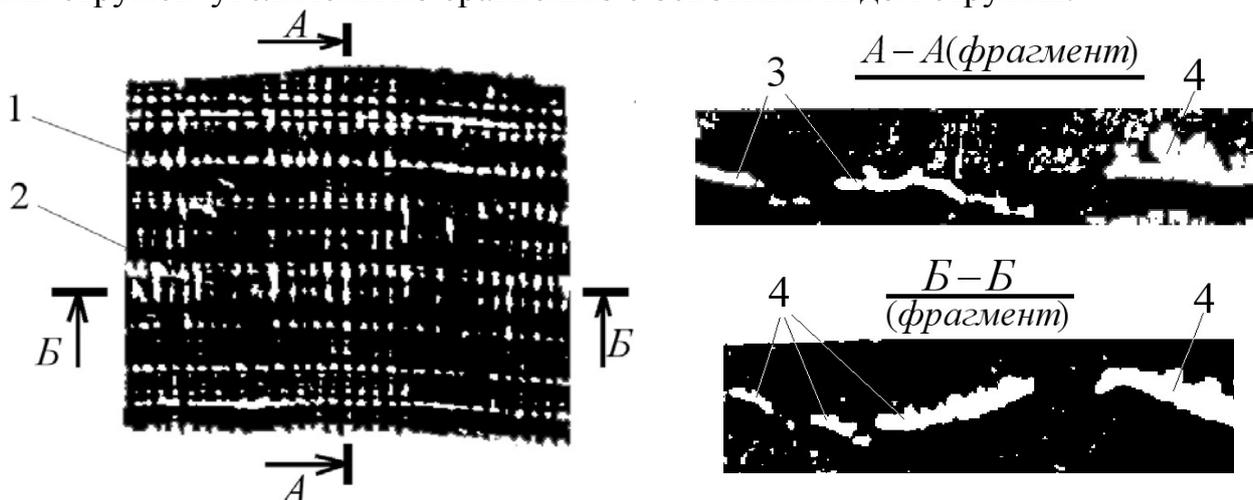


Рис. 4. Фотография микростружки, полученной в условиях отсутствия устойчивости процесса резания (округленной РК) и шлифов ее поперечного и продольного сечений.

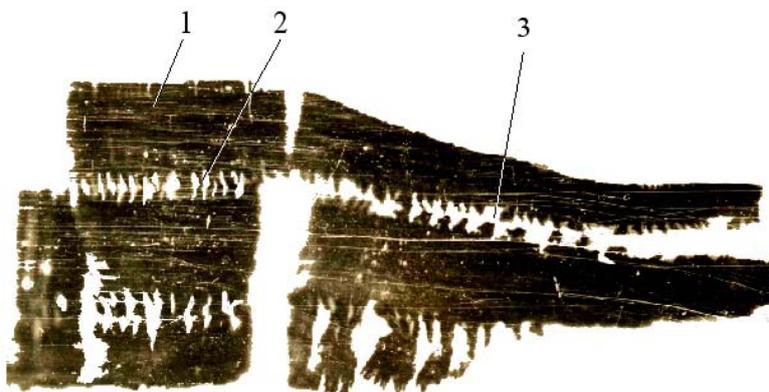


Рис. 5. Фотография микростружки, полученной в условиях отсутствия устойчивости процесса резания (округленной РК): 1 – тело стружки; 2 – пустоты, связанные с нестабильностью резания; 3 – разрыв, возникший при подготовке тонкой стружки к фотографированию.

В настоящее время производится обработка экспериментальных результатов по микростроганию с постоянной и переменной толщинами среза для ряда конструкционных материалов. По мнению авторов, эти данные позволят получать уточненные диагностические модели состояний РК для различных стадиях износа РИ в условиях тонких срезов.

Литература: 1. Деревянченко А.Г., Павленко В.Д., Андреев А.В. Диагностирование состояний режущих инструментов при прецизионной обработке. – Одесса: Астропринт. – 1999. – 184 с.

УДК 621.9

СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ ЗЕНКЕРОВ

Яцун Е.И., канд. техн. наук (г. Курск, Россия)

We present an advanced method of forming the cutting part countersink.

В связи с постоянным повышением требований к качеству обработки, усложнением конструкций деталей для механической обработки поверхностей наряду со стандартным и нормализованным инструментом применяют специальные металлорежущие инструменты – фасонные и ступенчатые осевые инструменты, в частности, фасонные и ступенчатые цельные и сборные зенкеры (рис. 1).

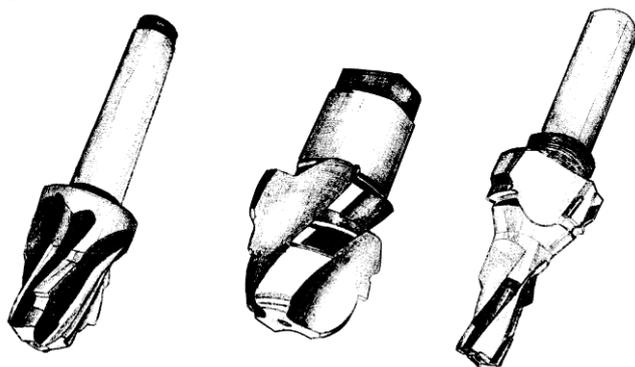


Рис. 1. Фасонные зенкеры.

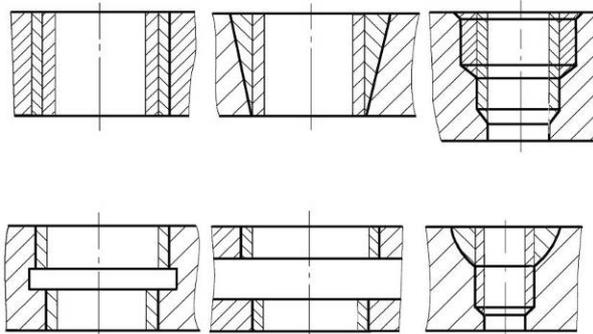


Рис. 2. Поверхности, обрабатываемые зенкерами.

Формирование поверхностей при обработке отверстий зенкерованием обеспечивает обработку нескольких поверхностей – фасонных, прерывистых, ступенчатых (рис. 2).

Цельные фасонные зенкеры выполняются с режущей частью из быстрорежущей стали или твердого сплава. Для сохранения прочности зуба по всей длине режущей части при постоянной высоте зуба фасонного зенкера сердцевина его корпуса должна быть выполнена в общем случае нецилиндрической, при обработке принимается конической (рис. 3). Для отвода стружки в требуемом направлении стружечные канавки должны быть винтовыми. В общем случае рациональные геометрические параметры фасонного зенкера легче обеспечить при правых стружечных канавках. При этом винтовой параметр передней поверхности зенкера $\rho > 0$; винтовой параметр задней поверхности $\rho_3 > 0$. Левые стружечные канавки ($\rho < 0$; $\rho_3 < 0$) необходимы в тех случаях, когда обязательным условием работы фасонного зенкера является направление выхода струж-

ки вперед при сквозном отверстии. Такое направление является обязательным условием работоспособности фасонного зенкера при высоких требованиях к шероховатости поверхности отверстия или при обработке высокотвердых материалов.

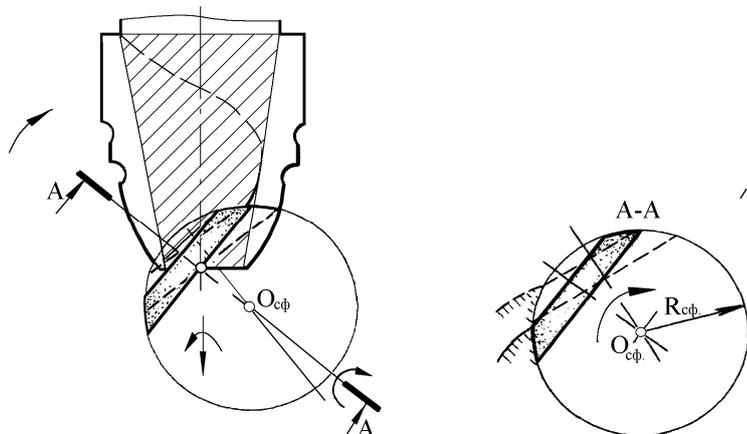


Рис. 3. Способ обработки винтовой передней поверхности зенкера.

Особенности геометрических параметров фасонного зенкера с левыми стружечными канавками таковы: выход стружки вперед зависит от значения угла наклона винтовой линии ω ; угла наклона режущей кромки λ ; угла в плане φ . Значения этих параметров должны выбираться из условия обеспечения направления выхода стружки. Эти значения при

$\lambda < 0$ и $\omega < 0$ должны быть достаточно большими. Чем меньше значение угла φ , тем в большей степени направление выхода стружки приближается к оптимальному – вперед, параллельно оси зенкера. Обычно величины угла φ принимаются 45° или 60° . Угол ω принимают в пределах $-12^\circ \dots -24^\circ$.

Большие значения угла $\omega = -12^\circ \dots -16^\circ$ принимаются для коротких отверстий при отношении l/d до 2. При увеличении угла ω не обеспечивается выход стружки вперед. При больших отрицательных значениях угла ω трудно обеспечить наличие положительного переднего угла γ_m , заданного в торцевой плоскости. Поэтому одной из основных задач выбора и оптимизации геометрических параметров фасонного зенкера с левыми стружечными канавками является обеспечение максимального значения переднего угла γ_T при наличии отрицательных значений углов ω и λ . Способы формирования винтовых поверхностей режущей части фасонных зенкеров с нецилиндрической сердцевиной стандартными дисковыми инструментами обеспечивают получение этих поверхностей с большими геометрическими погрешностями формы. Передняя поверхность получается как поверхность с непрерывно изменяющейся образующей – восстановить такую поверхность при переточках невозможно. Режущая кромка как линия пересечения производящей поверхности зенкера с передней поверхностью является сложной пространственной кривой. В результате каждой переточки фасонного зенкера по передней поверхности его режущая кромка изменяет свою форму, что вызывает погрешности формируемой поверхности.

При формировании винтовой поверхности постоянного шага должна использоваться производящая поверхность дискового инструмента, которая при отводе от оси зенкера в следствии нецилиндричности его сердцевин (рис. 4) не нарушит условий сопряжения этих поверхностей. Теоретически таким требованиям отвечают три поверхности; плоскость, круглый цилиндр и сфера. Использование в качестве производящей поверхности дискового инструмента поверхности сферы позволяет изменять ее диаметр в значительных пределах. При

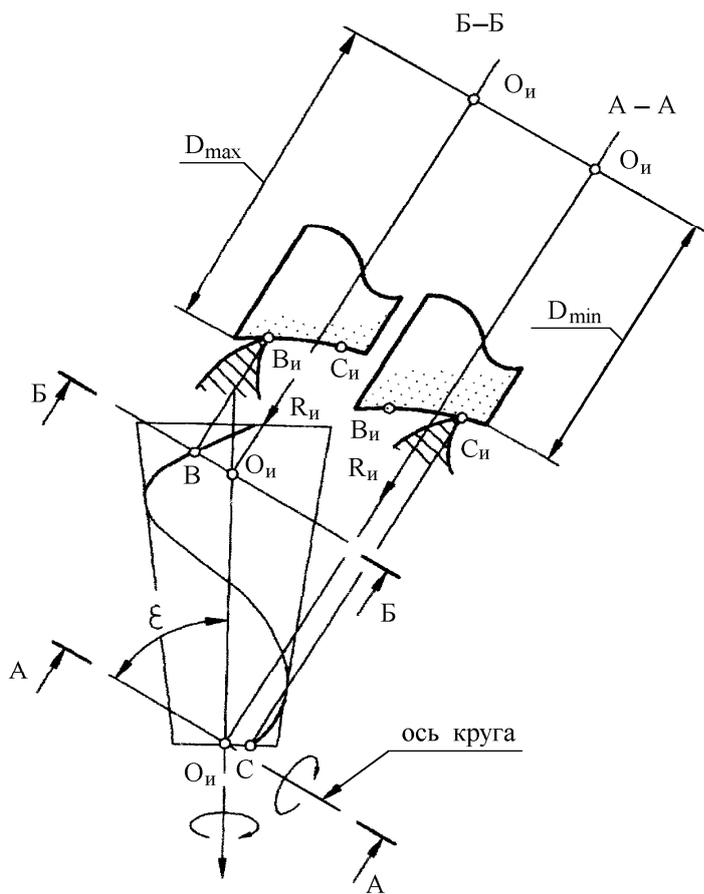


Рис. 4. Способ формирования задней поверхности зенкера.

лованной винтовой постоянного шага, образованной винтовым движением режущей кромки (рис.4).

Получить такую поверхность можно фасонным дисковым инструментом, профиль которого рассчитан с соблюдением условий неподрезания соседнего зуба зенкера при формировании спинки зуба.

Предложенный способ формирования винтовой передней поверхности и режущей кромки возможно осуществить без применения каких-либо специальных приспособлений на многокоординатных станках с ЧПУ, например заточных 4-х координатных для заточки винтовых зубьев.

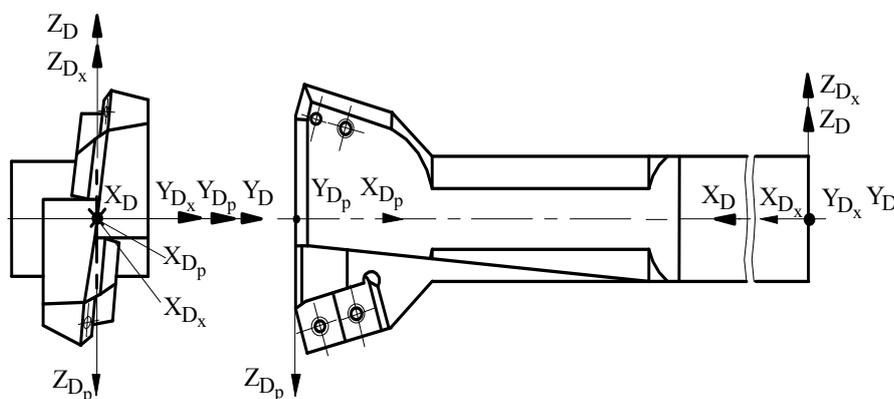


Рис. 6. Корпус фасонного зенкера.

этом условия формообразования винтовой передней поверхности не изменятся /1/.

При обработке винтовой передней поверхности зенкеру сообщается винтовое движение, а инструменту 2-го порядка – вращение с одновременным отводом его от оси зенкера. Производящей поверхностью инструмента 2-го порядка является сфера, которую отводят от оси изделия поворотом вокруг центра сферы (рис. 3).

Для сохранения формы режущей кромки после переточек фасонного зенкера передняя поверхность должна выполняться винтовой постоянного шага, а задняя поверхность – заты-

Широкое применение современных режущих инструментов, оснащенных сменными многогранными пластинами (СМП) различных форм с комплексными износостойкими покрытиями, обеспечивает

надежность работы станков с ЧПУ. Использование сборных зенкеров с СМП (рис. 6) исключает операцию заточки инструмента. Вопрос выбора, размещения и ориентации пластин является довольно сложным, а для обеспечения заданного качества обработанной поверхности требует компьютерного моделирования работы инструмента на стадии проектирования инструмента, а не в процессе эксплуатации.

Процесс проектирования, конструирования и изготовления включает математический синтез конструкции сборного зенкера с СМП с использованием трехмерной модели, численное моделирование работы зенкера и оценку результатов проектирования сборного зенкера по характеру изменения кинематических углов, параметров срезаемых слоев, высоты и среднего шага неровностей обрабатываемой поверхности.

На основе геометрической теории формирования поверхностей режущими инструментами [2], включающего графоаналитическое описание технологической системы разработано программное обеспечение автоматизированного синтеза сборных зенкеров с СМП. Исходя из матриц установки для каждого элемента технологической системы производится расчет кинематических углов (передний, задний угол, угол наклона главной режущей кромки) вдоль режущей кромки; высоты и среднего шага неровностей обрабатываемой поверхности; параметров технологической наладки обработки корпуса зенкера; координат узлов точек эквидистанты движения инструмента второго порядка. Также рассчитываются параметры наладки и управляющие программы для обработки корпуса зенкера на станке с ЧПУ [3].

Литература: 1. Лашнев С.И., Яцун Е.И. Метод формообразования зубьев фасонных инструментов с нецилиндрической сердцевиной. – Сборник научных трудов. – Тула, 1992. – 71 с. 2. Лашнев С.И., Емельянов С.Г., Борисов А.Н. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами. – Курск, 1997. – 390 с. 3. Мержоева М.С. Повышение эффективности проектирования сборных зенкеров. – Автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Орел, 2004. – 20 с.

УДК 621.02.001.63

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НАЛАДКИ СТАНКА И ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ КОРПУСОВ В САД/САМ СИСТЕМЕ СБОРНЫХ ОСЕВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Зубкова О.С., канд. техн. наук, **Фадеев А.А.** (г. Курск, Россия)

Consider the particular calculation of parameters of the machine set-up and adaptation of the second-order processing elements of the prefabricated housing drills.

При построении системы автоматизированного проектирования и изготовления целесообразно рассматривать сборный осевой инструмент, как сложную техническую систему, к которой может быть применен блочно-иерархический принцип разбиения. В этом случае инструмент разбивается на ряд модулей, каждый из которых в свою очередь может состоять из элементов более низкого уровня. Для обработки каждого такого элемента составляются параметризованные управляющие программы, из которых затем комплектуют-

ся операции в зависимости от используемого оборудования. На определенных операциях станки с ЧПУ могут быть заменены универсальным оборудованием.

Такое представление сборного осевого инструмента позволяет вносить изменения в конструкцию путем замены элементов одного и того же назначения, но разных исполнений, а так же изменения их ориентации относительно других элементов или модулей. Изменения в технологическом процессе осуществляются за счет выбора того или иного варианта управляющей программы, а так же построения технологической цепочки операций [1].

При осуществлении обработки корпусов сборных осевых инструментов необходимо выполнить наладку станка и приспособления. Взаимосвязь между корпусом инструмента, станком 2-го порядка и приспособлением 2-го порядка следующая.

Считаем, что на j -ой операции производится обработка k -го элемента корпуса (система координат $X_{D_k} Y_{D_k} Z_{D_k}$), положение которого относительно корпуса (система координат $X_D Y_D Z_D$) определяется матрицей M_{DD_k} (рис. 1).

Корпус закреплен в приспособлении (система координат $X_J Y_J Z_J$) с матрицей

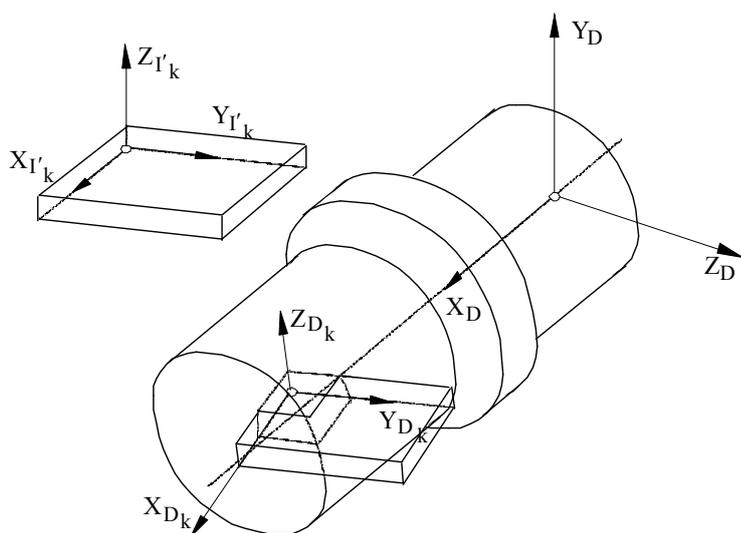


Рис. 1. Установка элемента корпуса относительно зоны обработки станка 2-го порядка.

установки M_{JD} , а приспособление в свою очередь установлено на станке (система координат $X_I Y_I Z_I$), матрица перехода – M_{IJ} . Наладка станка производится за счет шести степеней свободы, которые в общем случае могут быть произвольным образом распределены между станком ($\alpha_{1k}, \dots, \alpha_{nk}$) и приспособлением ($\beta_{1k}, \dots, \beta_{mk}$) в зависимости от их технологических возможностей.

Задачей наладки является отработка таких значений

параметров наладки $\alpha_{1k}, \dots, \alpha_{nk}, \beta_{1k}, \dots, \beta_{mk}$, где $n+m=6$, при которых система координат $X_{D_k} Y_{D_k} Z_{D_k}$ k -го элемента корпуса совпадет с системой координат $X_{I_k} Y_{I_k} Z_{I_k}$ зоны обработки станка, фиксируемой заданной матрицей перехода M_{II_k} . Под зоной обработки станка понимается область в системе координат станка в которой выполняется управляющая программа для обработки k -го элемента. При наладке станка обрабатываются значения его параметров наладки, которые заложены в структуре матрицы $M_{II'}(\alpha_{1k}, \dots, \alpha_{nk})$, определяющей перевод приспособления с закрепленным в нем корпусом в новое положение, обозначенное штрихом. При наладке приспособления обрабатываются значения его параметров наладки, которые заложены в структуре матрицы

$M_{J'J''}(\beta_{1k}, \dots, \beta_{mk})$, определяющей перевод корпуса в новое положение, обозначенное двумя штрихами.

Для того, чтобы матрица $M_{D_k^* V_k}$ стала единичной, необходимо решить относительно параметров наладки $\alpha_{1k}, \dots, \alpha_{nk}, \beta_{1k}, \dots, \beta_{mk}$ следующее матричное уравнение:

$$\left(M_{DD_k}^j\right)^{-1} = M_{II_k}^{-1} M_{IJ} M_{JJ'}(\alpha_{1k}, \dots, \alpha_{nk}) M_{J'D'} M_{D'D''}(\beta_{1k}, \dots, \beta_{mk}),$$

а при отсутствии приспособления – уравнение

$$\left(M_{DD_k}^j\right)^{-1} = M_{II_k}^{-1} M_{ID} M_{DD'}(\alpha_{1k}, \dots, \alpha_{nk}).$$

Список литературы: 1. Фадеев А.А. Дискретное представление образующей фрезеруемого паза концевой фрезой // Физические и компьютерные технологии. – Труды 13-й Межд. научн. техн. конф., 19-20 апреля 2007. – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2007. – С. 268-270.

УДК 621.923

ЗАКОНОМЕРНОСТИ МЕХАНИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Новиков Г.В., канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)

We justify the technological capabilities of processing of materials by cutting blade and abrasive tools based on theoretical analysis of the conditions of the process of chip.

Повышение эффективности механической обработки деталей машин является одним из основных направлений развития современного машиностроения и создания конкурентноспособной продукции. Для его реализации важно располагать фундаментальными знаниями о потенциальных возможностях процессов механической обработки и путях их практического использования. Вместе с тем, в настоящее время теория обработки материалов резанием в полной мере математически не формализована, что не позволяет решить ряд сложных задач по оптимизации параметров процессов резания материалов в плане повышения их производительности и снижения энергоемкости, улучшения качества обработки. Целью работы является обоснование технологических возможностей обработки материалов резанием лезвийными и абразивными инструментами на основе теоретического анализа условий осуществления процесса стружкообразования.

В ранее опубликованных работах [1–7] приведена разработанная математическая модель стружкообразования при резании материалов и аналитическая зависимость, устанавливающая связь между углом сдвига материала при резании β (рис. 1) и коэффициентом $K_{pez} = P_z / P_y$, равным отношению тангенциальной P_z и радиальной P_y составляющих силы резания:

$$tg 2\beta = K_{pez}, \quad (1)$$

где $K_{pez} = ctg(\psi - \gamma)$; γ – передний угол режущего инструмента, град; ψ – условный угол трения обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента, град ($tg \psi = f$ – коэффициент трения).

Общеизвестно, что чем больше угол сдвига материала β , тем меньше энергоёмкость процесса резания и соответственно выше его эффективность. Поэтому, увеличивая коэффициент $K_{рез}$, можно увеличить угол сдвига материала β и добиться повышения эффективности процесса резания. В связи с этим важно провести анализ закономерностей изменения коэффициента $K_{рез}$. Из рис. 1 несложно определить составляющие силы резания P_z и P_y :

$$\begin{cases} P_z = N \cdot \cos \gamma + f \cdot N \cdot \sin \gamma = P_0 \cdot \cos(\psi - \gamma), \\ P_y = -N \cdot \sin \gamma + f \cdot N \cdot \cos \gamma = P_0 \cdot \sin(\psi - \gamma), \end{cases} \quad (2)$$

где $P_0 = N / \cos \psi$.

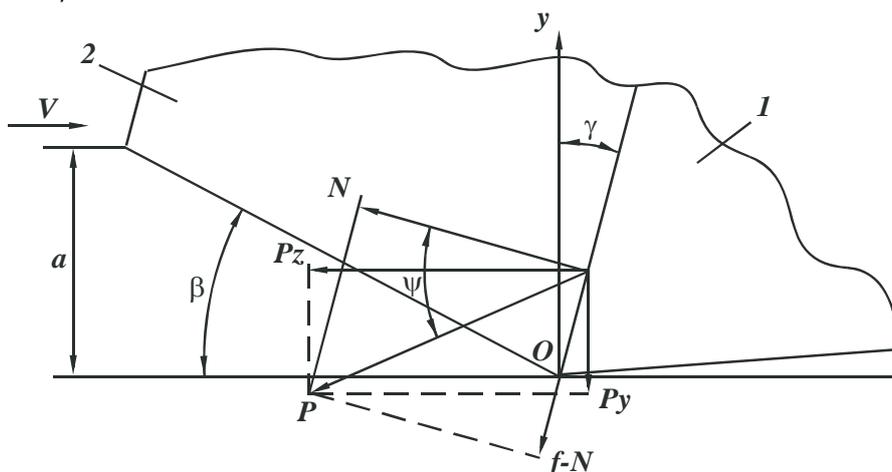


Рис. 1. Расчетная схема процесса резания: 1 – резец; 2-стружка.

На основе системы (2) приходим к зависимости (1). На рис. 2,а показан характер изменения составляющих силы резания P_z и P_y . Как видно, с увеличением угла $(\psi - \gamma)$ в пределах от 0 до 90° тангенциальная составляющая силы резания P_z уменьшается, а радиальная составляющая силы резания P_y , наоборот, увеличивается. Отношение P_z / P_y , определяющее коэффициент $K_{рез}$, с увеличением угла $(\psi - \gamma)$ уменьшается, рис. 2,б. Процесс резания осуществим при положительных значениях коэффициента $K_{рез}$, т.е. при значениях угла $(\psi - \gamma)$, изменяющихся в пределах 0 до 90° . Из зависимостей (2) и рис. 2,а вытекает, что при $(\psi - \gamma) = 0$ тангенциальная составляющая силы резания $P_z = 0$, а при $(\psi - \gamma) = 90^\circ$ – радиальная составляющая силы резания $P_y = 0$. Учитывая то, что передний угол режущего инструмента γ может быть положительным и отрицательным, возможны два случая: $K_{рез} = \text{ctg}(\psi - \gamma)$ и $K_{рез} = \text{ctg}(\psi + \gamma)$. Первый случай реализуем для положительного переднего угла γ при условии $(\psi - \gamma) < \psi$, т.е. при изменении угла $(\psi - \gamma)$ в пределах $0 \dots \psi$, рис. 2,б. Второй случай реализуем для отрицательного переднего угла γ при условии $(\psi + \gamma) > \psi$, т.е. при изменении угла $(\psi + \gamma)$ в пределах $\psi \dots 90^\circ$. Угол $(\psi - \gamma) = \psi$ при $\gamma = 0$, рис. 2,б.

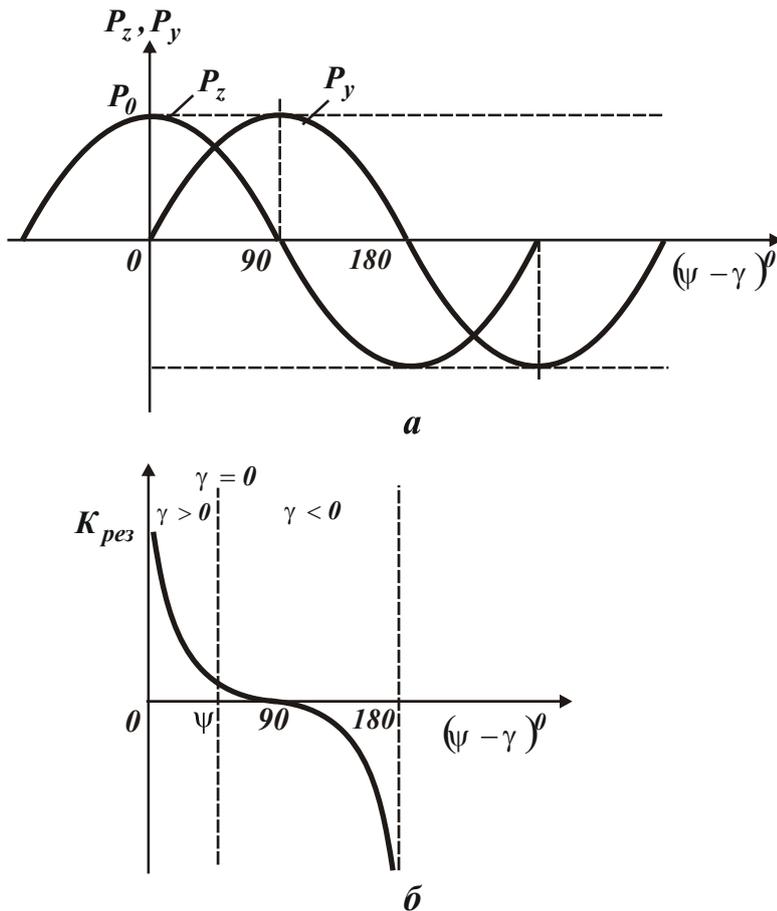


Рис. 2. Зависимости P_z, P_v (а) и $K_{рез}$ (б) от $(\psi - \gamma)$.

является значение угла ψ . При резании инструментами из твердых сплавов и инструментальных сталей угол ψ принимает значения, близкие 45° . Тогда $K_{рез} \approx 1$ и можно полагать, что лезвийная обработки реализуется при значениях $K_{рез} = 1 \dots 10$ и более, а абразивная обработка – при $K_{рез} < 1$ (в основном при $K_{рез} = 0,1 \dots 0,5$).

Очевидно, первый случай осуществим при резании лезвийным инструментом с положительным передним углом γ . Второй случай – в основном при резании абразивными инструментами, поскольку режущие абразивные зерна имеют отрицательные передние углы. В первом случае коэффициент $K_{рез}$ больше, чем во втором случае (табл. 1), т.е. при лезвийной обработке коэффициент $K_{рез}$ больше, чем при абразивной обработке, что хорошо согласуется с практическими данными. Исходя из этого, границей раздела лезвийной и абразивной обработки яв-

Таблица 1
Расчетные значения коэффициента $K_{рез} = ctg(\psi - \gamma)$

$(\psi - \gamma)$, град	0	5	10	15	20	25	30	40	45	50	60	70	80	90
$K_{рез}$	∞	11,4	5,7	3,7	2,7	2,1	1,7	1,2	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0

Исходя из такого геометрического представления коэффициента $K_{рез}$, можно более полно оценить возможности его увеличения с целью увеличения угла сдвига материала β и соответственно повышения эффективности процесса резания. Основным путем увеличения коэффициента $K_{рез}$ несомненно является уменьшение условного угла трения на передней поверхности инструмента ψ . Это сужает диапазоны изменения угла $(\psi - \gamma)$ и положительного переднего угла инструмента γ , т.е. сужает диапазон резания инструментом с положитель-

ным углом γ . Угол γ не может быть больше угла ψ . Следовательно, при использовании алмазных режущих лезвийных инструментов, характеризующихся наименьшим коэффициентом трения f с обрабатываемым материалом, передний угол инструмента γ необходимо устанавливать близким к нулю. В противном случае процесс стружкообразования при резании может быть неосуществим.

В тоже время уменьшение угла ψ расширяет диапазон резания инструментом с отрицательным передним углом γ , реализуемый при условии $(\psi + \gamma) > \psi$. Это указывает на то, что процесс резания может быть осуществим при больших отрицательных передних углах инструмента, например, при резании алмазными зернами. Так как условный угол трения ψ для алмаза может принимать значения 10^0 и менее, то отрицательный передний угол режущего алмазного зерна может достигать значения 80^0 , т.е. процесс стружкообразования осуществим при микрорезании практически затупленным алмазным зерном. Применение абразивных зерен, характеризующихся более высокими значениями коэффициента трения f и соответственно условного угла трения ψ , позволяет реализовать процесс стружкообразования при меньших отрицательных передних углах γ . Этим объясняется эффективность применения алмазно-абразивной обработки.

Из табл. 1 вытекает, что при резании лезвийным алмазным инструментом, вследствие возможного изменения угла $(\psi - \gamma)$ в пределах $5...15^0$, коэффициент $K_{рез}$ может принимать относительно большие значения – 3,7...11,4. При алмазно-абразивной обработке, например, реализующей условия $\psi = 10^0$ и $\gamma = -40...80^0$, коэффициент $K_{рез}$ меньше единицы и равен 0,8...0. При резании лезвийными инструментами из твердых сплавов и инструментальных сталей условный угол трения ψ значительно больше, чем при резании алмазным инструментом и достигает значений $30...50^0$. Это расширяет диапазон изменения угла $(\psi - \gamma)$ и позволяет увеличить положительный передний угол инструмента γ до значений $30...45^0$, что реализуемо на практике. В результате угол $(\psi - \gamma) \rightarrow 0$, а коэффициент $K_{рез}$ существенно увеличивается, что повышает угол сдвига материала β и соответственно эффективность процесса резания.

Таким образом показано, что для достижения одного и того же значения коэффициента $K_{рез}$ при резании лезвийными инструментами из твердых сплавов и инструментальных материалов, характеризующихся более высокими коэффициентами трения f по сравнению с алмазным инструментом, необходимо существенно увеличить передний угол γ . Как известно, в ряде случаев, например при прерывистом резании (в условиях возникновения ударных нагрузок), это ведет к снижению прочности режущего клина инструмента и соответственно его работоспособности, что неэффективно. Поэтому с целью уменьшения переднего угла инструмента γ при одновременном обеспечении высоких значений коэффициента $K_{рез}$ необходимо уменьшить угол ψ (коэффициент трения f) за счет использования эффективных технологических сред и т.д.

Применим полученное решение для анализа случая $\psi = 0$. Исходя из рис. 2,б, в этом случае передний угол инструмента γ может быть лишь отрицательным. Следовательно, реализуем лишь процесс алмазно-абразивной обработки. Этим показано, что процесс резания лезвийным инструментом с положительным передним углом может быть осуществим при условии наличия трения сходящей стружки с передней поверхности инструмента. При отсутствии трения передний угол инструмента γ должен быть отрицательным (в пределе равным нулю).

На основе сказанного можно заключить, что создание положительного переднего угла инструмента продиктовано исключительно необходимостью снижения отрицательного влияния силы трения сходящей стружки с передней

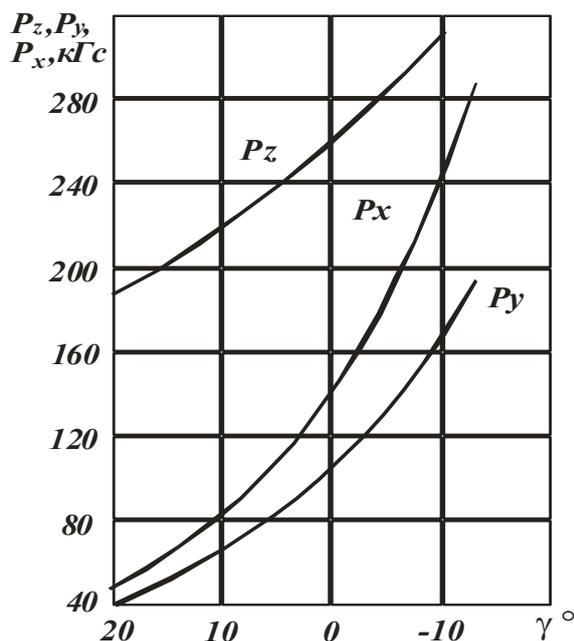


Рис. 3. Влияние переднего угла на силы P_z, P_y, P_x при точении (сталь 40; $\varphi = 60^\circ$; $t = 4$ мм; $s = 0,285$ мм/об; $V = 40$ м/мин).

рыкина К.А.

$$\beta = 45^\circ + \frac{\gamma - \psi}{2}, \quad (3)$$

будет принимать значения, меньшие 45° . Это подтверждается практическими данными, согласно которым угол сдвига материала β при резании лезвийными и абразивными инструментами всегда меньше 45° . Причем, чем больше угол $(\psi - \gamma)$, тем меньше β .

Произведем количественную оценку приведенного выше теоретического решения. Для этого установим характер изменения коэффициента $K_{рез}$ от угла $(\psi - \gamma)$. Рассмотрим два случая. В первом случае переменным будет передний угол резца γ , а во втором случае – условный угол трения ψ на передней поверхности резца. Для анализа первого случая рассмотрим известные экспериментальные данные, приведенные в работе [8], рис. 3.

поверхности инструмента на процесс стружкообразования (уменьшение коэффициента $K_{рез}$ и угла сдвига материала β). Чем ниже интенсивность трения в зоне резания, тем меньше должен быть положительный передний угол инструмента. Оптимальным передним углом инструмента с точки зрения улучшения условий стружкообразования при резании с незначительной интенсивностью трения обрабатываемого и инструментального материалов должен быть угол, близкий к нулю.

Поскольку справедливо условие $(\psi - \gamma) > 0$, то угол сдвига материала β , определяемый по известной формуле профессора Зво-

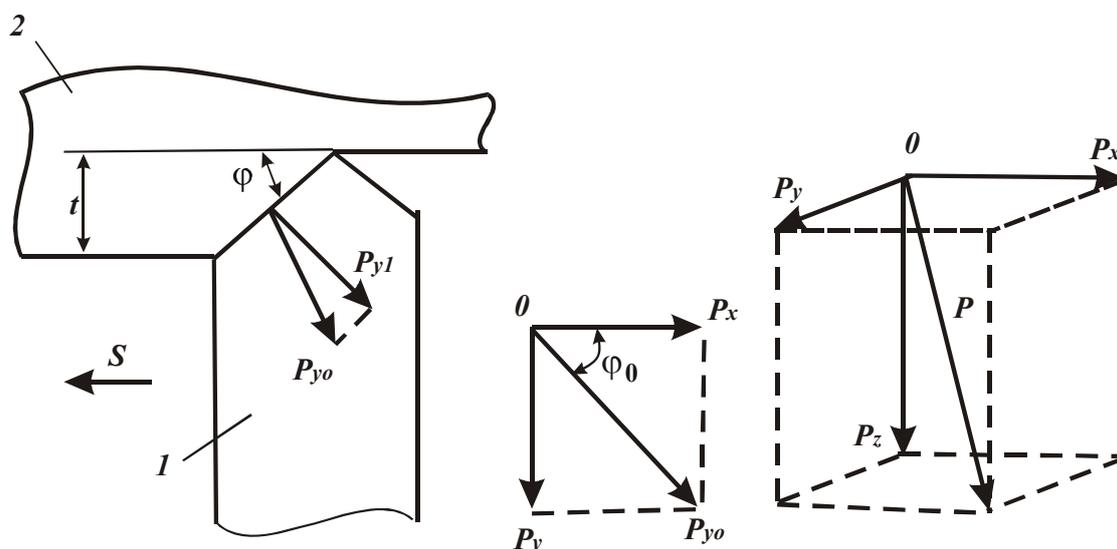


Рис. 4. Положение составляющих силы резания при точении: 1 – резец; 2 – заготовка.

Учитывая то, что сила резания имеет три составляющие: P_z, P_y, P_x , коэффициент $K_{рез}$ рассчитаем по зависимости $K_{рез} = P_z / P_{y1}$, где $P_{y1} = P_{y0} \cdot \cos \varphi'_0$; $P_{y0} = \sqrt{P_y^2 + P_x^2}$; $\varphi'_0 = (\varphi + \varphi_0) - 90^\circ$; $\text{tg } \varphi_0 = P_y / P_x$ (рис. 4). Здесь P_{y0} - равнодействующая двух сил P_y, P_x ; P_{y1} - проекция равнодействующей силы P_{y0} на нормаль к главному лезвию резца; φ - главный угол резца в плане; φ_0 - угол между силами P_x и P_{y0} ; φ'_0 - угол между силой P_{y0} и ее проекцией P_{y1} . В табл. 2 приведены расчетные значения углов φ_0 и φ'_0 , коэффициента $K_{рез} = P_z / P_{y1}$, условного угла трения ψ и коэффициента трения f в зависимости от переднего угла инструмента γ .

Таблица 2

Расчетные значения параметров $\gamma, \varphi_0, \varphi'_0, K_{рез}, \psi, f$

γ , град	20	10	0	-10
φ_0 , град	39	39	40	35
φ'_0 , град	9	9	10	5
$K_{рез}$	2,9	2,23	1,5	1,08
ψ , град	39	34	34	35
f	0,8	0,67	0,67	0,7

Как видно, с уменьшением переднего угла инструмента γ и переходом его в область отрицательных значений, коэффициент $K_{рез}$ уменьшается (рис. 5), что хорошо согласуется с вышеприведенными теоретическими результатами (рис. 2,б). Коэффициент трения f также уменьшается с уменьшением γ , что связано с повышением температуры резания вследствие интенсивного роста составляющих силы резания P_z и P_y (рис. 3).

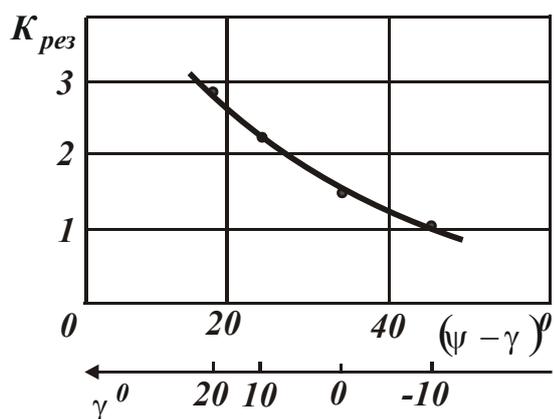


Рис. 5. Зависимость коэффициента $K_{рез}$ от угла $(\psi - \gamma)$.

видно, с увеличением скорости резания V коэффициент $K_{рез}$ увеличивается, а угол $(\psi - \gamma)$ — уменьшается, что связано с уменьшением условного угла трения ψ (т.к. передний угол резца γ остается постоянным). Это хорошо согласуется с теоретическими результатами, рис. 2,б.

Рассмотрим случай изменения угла $(\psi - \gamma)$ за счет изменения условного угла трения ψ на передней поверхности резца путем увеличения скорости резания V . Для этого воспользуемся экспериментальными данными, приведенными в работе [9], рис. 6. Коэффициент $K_{рез}$ определим по зависимости $K_{рез} = P_z / \sqrt{P_y^2 + P_x^2}$, а угол $(\psi - \gamma)$ — по зависимости $K_{рез} = ctg(\psi - \gamma)$, табл. 3, рис. 7. Как

Таблица 3

Значения параметров $K_{рез}$ и $(\psi - \gamma)$

V , м/мин	20	40	80	120
$K_{рез}$	3	4,4	5,4	7
$(\psi - \gamma)$, град	18	13	10	8

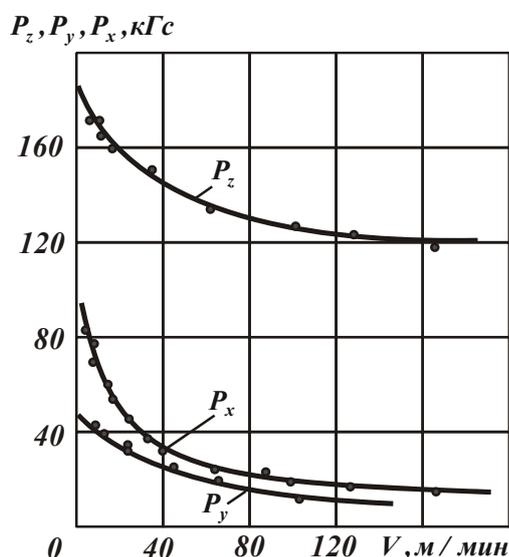


Рис. 6. Влияние скорости резания V на составляющие силы резания P_z, P_y, P_x при точении (титановый сплав ВТ1; $\varphi=70^\circ$; $t=2,5$ мм; $s=0,47$ мм/об).

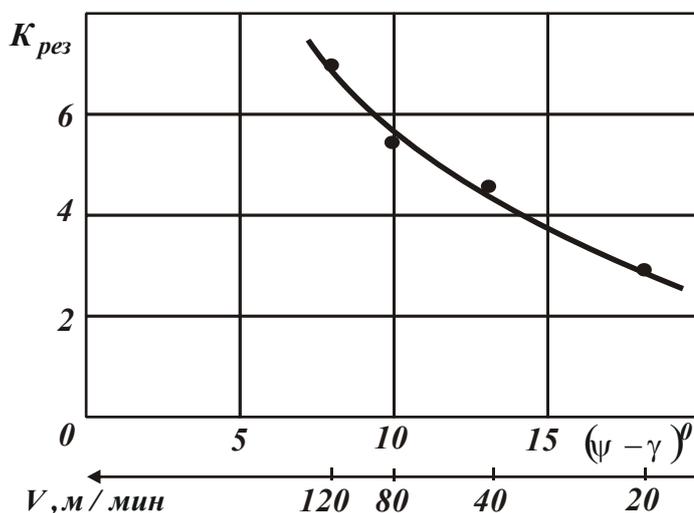


Рис. 7. Зависимость коэффициента $K_{рез}$ от угла $(\psi - \gamma)$.

Выводы. Теоретически обоснованы условия осуществления процесса стружкообразования при резании материалов лезвийными и абразивными инструментами. Раскрыта физическая сущность взаимосвязи переднего угла ин-

струмента с условным углом трения обрабатываемого материала с передней поверхностью режущего инструмента. Показано, что чем меньше условный угол трения, тем меньше должен быть положительный передний угол инструмента с точки зрения улучшения условий стружкообразования при резании. С уменьшением условного угла трения также расширяется диапазон изменения отрицательного переднего угла инструмента, при котором осуществим процесс стружкообразования, что очень важно для эффективного ведения процессов абразивной и алмазно-абразивной обработки инструментами с недостаточно высокой режущей способностью. Например, при шлифовании кругом, работающим в режиме затупления.

Литература: 1. Новиков Г.В. Физические закономерности процесса стружкообразования при алмазно-абразивной обработке. – Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2002. – № 9, т. 11. – С. 47-52. 2. Новиков Г.В. О механизме стружкообразования при резании материалов. – Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – “Підвищення надійності відновлюємих деталей машин”. – 2003. – Вип. 18. – С. 51-58. 3. Новиков Г.В. Аналитические зависимости механики резания материалов. – Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. – Труды 9-й Международной научно-технической конференции, 3-4 июня 2004г. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2004. – С. 3-7. 4. Новиков Г.В. Аналитическая модель силовой напряженности процесса резания с переменной толщиной среза. – Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць НТУ “ХПІ”. – Харків, 2004. – Вип. 2(9) – С. 149-154. 5. Новиков Г.В. Элементы теории энергоемкости процессов механической обработки. – Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ “ХПІ”. – Харків, 2006. – Вип. 2 (13). – С. 74-86. 6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.1. “Механика резания материалов” – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. 7. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.4. “Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов” – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с. 8. Зорев Н.Н. Вопросы механики процессов резания металлов. – М.: Машгиз, 1956. – 367 с. 9. Полетика М.Ф. Исследование процесса резания титановых сплавов. – В кн.: Обрабатываемость жаропрочных и титановых сплавов. – Куйбышевское областное книжное издательство, 1962. – С. 28-35.

УДК 621.923

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ
СЪЕМА ПРИПУСКА ПРИ ШЛИФОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ,
ВОССТАНОВЛЕННЫХ ИЗНОСОСТОЙКИМИ НАПЛАВОЧНЫМИ
МАТЕРИАЛАМИ**

Андилахай В.А. (г. Мариуполь, Украина)

We analytically defined pattern removal allowance for grinding parts, reduced wear-resistant surfacing materials.

Восстановление изношенных деталей износостойкими наплавками и покрытиями является важным условием повышения срока их работы [1]. В настоящее время разработаны эффективные технологии восстановления таким способом деталей. Однако, при шлифовании наплавки возникают проблемы, связанные с относительно низким качеством и производительностью обработки. В

особой мере это относится к шлифованию наплавков твердостью HRC 60 и более. Поэтому совершенствование технологии шлифования наплавочных материалов имеет важное и актуальное значение.

Восстановленная износостойким наплавочным материалом деталь характеризуется наличием на ее поверхности значительных выступов и впадин (микронеровностей высотой 1...3 мм), что, собственно, и затрудняет ее обработку в связи с необходимостью съема неравномерного припуска, вызывающего колебания в технологической системе, интенсивные динамические нагрузки и повышенную силовую и тепловую напряженность процесса шлифования. С целью повышения эффективности обработки таких деталей, оценим возможности применения наиболее прогрессивных схем шлифования, обеспечивающих уменьшение энергоемкости и увеличение производительности обработки. Для этого рассмотрим расчетную схему плоского шлифования, в которой снимаемый припуск представлен пакетом элементарных бесконечно тонких горизонтальных слоев, которые под разными углами входят в рабочую поверхность круга и срезаются режущими зёрнами, рис. 1. В работе [2] показано, что закономерности среза элементарного слоя можно аналитически описать вероятностной функцией $\Phi(y)$, изменяющейся в пределах 0...1 и определяющей, какая доля материала является неудаленной (рис. 2,а):

$$\Phi(y) = e^{-\frac{3m \cdot \text{tg} \gamma \cdot V_{кр}}{200\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет}} \cdot \sqrt{\frac{R_{кр}}{t_T}} \cdot y^3}, \quad (1)$$

где y – координата образующегося профиля, отсчитывается от вершины наиболее выступающего над уровнем связки зерна, м; m – объемная концентрация зерен круга (например, для 100%-ной концентрации зерен алмазного круга – $m=100$); \bar{X} – зернистость круга, м; γ – половина угла при вершине режущего конусообразного зерна; $V_{кр}$, $V_{дет}$ – скорости круга и детали, м/с; $R_{кр}$ – радиус круга, м; t_T – текущее значение глубины шлифования, м.

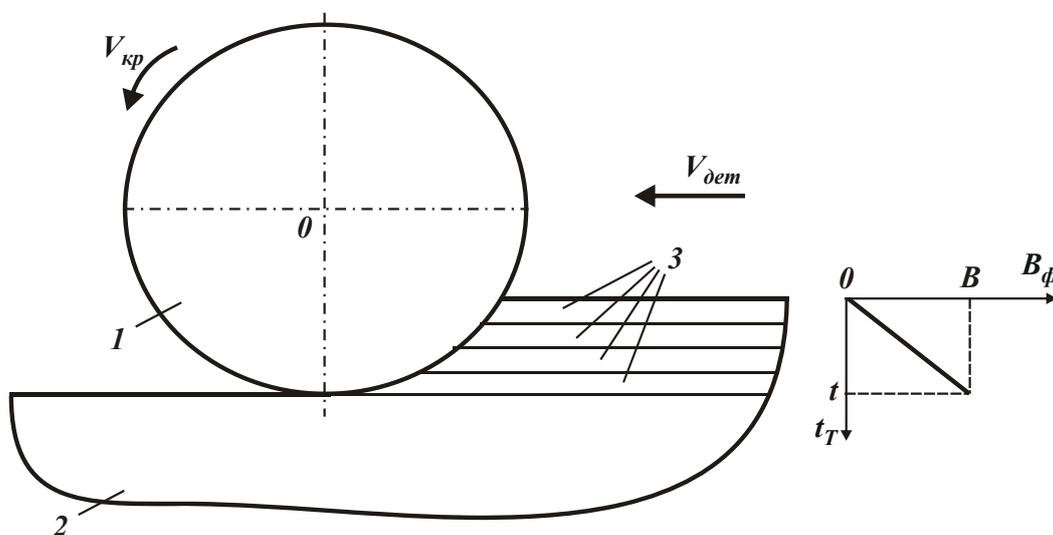


Рис. 1. Расчетная схема параметров плоского шлифования: 1 – круг; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – элементарные слои снимаемого припуска.

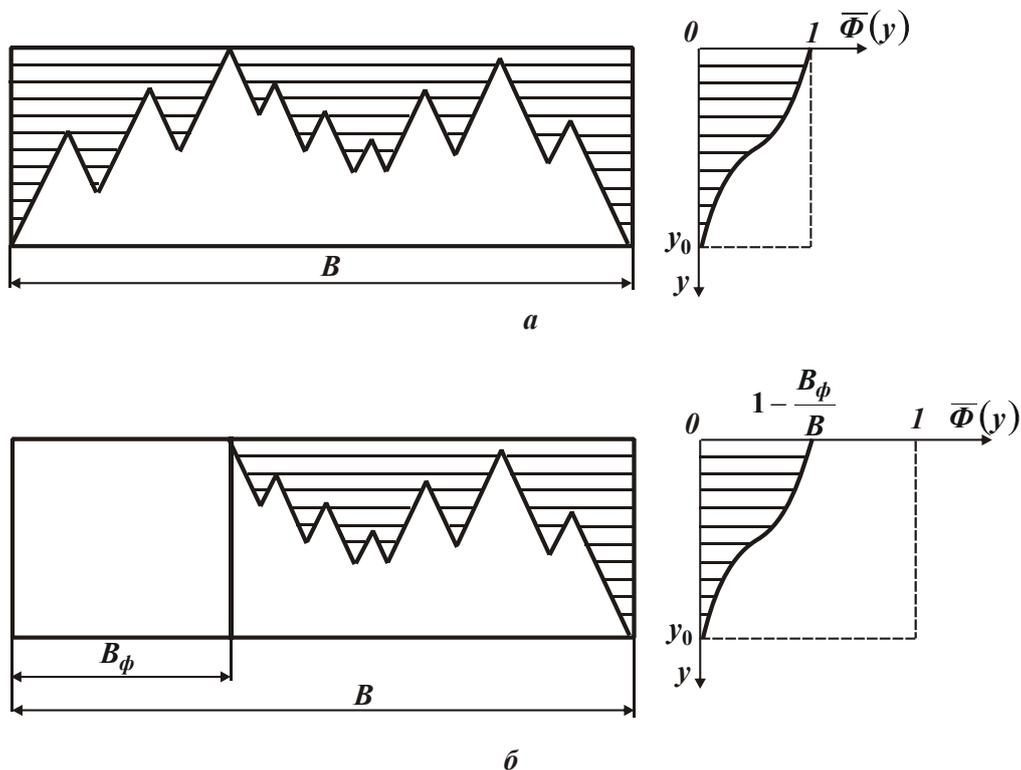


Рис. 2. Схемы образования микропрофиля на элементарном слое снимаемого припуска от наложения проекций зерен и общий вид функций $\Phi(y)$ и $\bar{\Phi}(y)$ при шлифовании сплошного (а) и несплошного (б) материала (наплавки).

Функция $\Phi(y)$ получена применительно к срезу элементарного слоя, состоящего из сплошного материала. При обработке наплавочного материала рассматриваемый элементарный слой снимаемого припуска будет состоять из отдельных, не связанных между собой участков материала. В результате фактическая ширина слоя B_ϕ (исключая пустоты) будет меньше номинальной ширины B , рис. 1. При этом фактическая ширина слоя B_ϕ будет увеличиваться по мере удаления от вершины наибольшей микронеровности вглубь наплавочного материала.

В первом приближении можно принять линейный закон изменения величины B_ϕ вглубь наплавочного материала, т.е. по мере увеличения текущего значения t_T глубины шлифования (рис. 1):

$$B_\phi = \frac{B}{t} \cdot t_T = B \cdot \frac{t_T}{t} . \quad (2)$$

В данном случае глубина шлифования t принята равной величине снимаемого припуска Π . Исходя из рис. 2,б, вероятность неудаления материала с элементарного слоя $\bar{\Phi}(y)$, в соответствии с теоремой умножения независимых случайных величин [3], будет определяться произведением вероятности наличия сплошного материала на элементарном слое $(1 - B_\phi / B)$ и функции $\Phi(y)$, т.е.

$$\bar{\Phi}(y) = \left(1 - \frac{B_\phi}{B}\right) \cdot \Phi(y) = \left(1 - \frac{t_T}{t}\right) \cdot e^{-\frac{3m \cdot \text{tg} \gamma \cdot V_{кр}}{200\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дем}} \cdot \sqrt{\frac{R_{кр}}{t_T}} \cdot y^3} . \quad (3)$$

Функция $\bar{\Phi}(y)$ изменяется в пределах $0 \dots (1 - t_T / t)$, асимптотически приближаясь к нулю, рис. 2,б. Поэтому установить значение координаты y_0 , при котором происходит полный срез элементарного слоя, можно лишь с определенным приближением, задавая конкретные значения $\bar{\Phi}(y_0)$. Тогда, логарифмируя функцию $\bar{\Phi}(y)$, имеем

$$y_0^3 = -\frac{200\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет}}{3 \cdot m \cdot tg\gamma \cdot V_{кр}} \cdot \sqrt{\frac{t_T}{R_{кр}}} \cdot \ln \frac{\bar{\Phi}(y_0)}{\left(1 - \frac{t_T}{t}\right)}. \quad (4)$$

Знак “-” в зависимости (4) означает то, что функция $\ln \frac{\bar{\Phi}(y_0)}{\left(1 - \frac{t_T}{t}\right)}$ является

отрицательной. Для удобства анализа зависимости (4) представим ее в виде:

$$y_0^3 = -A \cdot \sqrt{\frac{t_T}{t}} \cdot \ln \frac{\bar{\Phi}(y_0)}{\left(1 - \frac{t_T}{t}\right)}, \quad (5)$$

где $A = \frac{200\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет}}{3 \cdot m \cdot tg\gamma \cdot V_{кр}} \cdot \sqrt{\frac{t}{R_{кр}}}$.

Таблица 1

Расчетные значения величины y_0 при $A=1 \text{ мкм}^3$ и $\bar{\Phi}(y_0)=0,1$

$\frac{t_T}{t}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\sqrt{\frac{t_T}{t}}$	0	0,31	0,45	0,55	0,63	0,7	0,78	0,83	0,89	0,95
$-\ln \frac{\bar{\Phi}(y_0)}{\left(1 - \frac{t_T}{t}\right)}$	2,3	2,2	2,08	1,95	1,8	1,6	1,38	1,1	0,7	0
$y_0^3, \text{ мкм}$	0	0,682	0,936	1,072	1,134	1,12	1,076	0,913	0,623	0
$y_0, \text{ мкм}$	0	0,88	0,98	1,02	1,045	1,04	1,02	0,97	0,85	0

Таблица 2

Расчетные значения величины y_0 при $A=1 \text{ мкм}^3$ и $\bar{\Phi}(y_0)=0,1$

$\frac{t_T}{t}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\sqrt{\frac{t_T}{t}}$	0	0,31	0,45	0,55	0,63	0,7	0,78	0,83	0,89	0,95	1
$y_0^3, \text{ мкм}$	0	0,713	1,035	1,265	1,449	1,61	1,794	1,91	2,05	2,18	2,3
$y_0, \text{ мкм}$	0	0,89	1,01	1,08	1,14	1,18	1,22	1,24	1,27	1,3	1,33

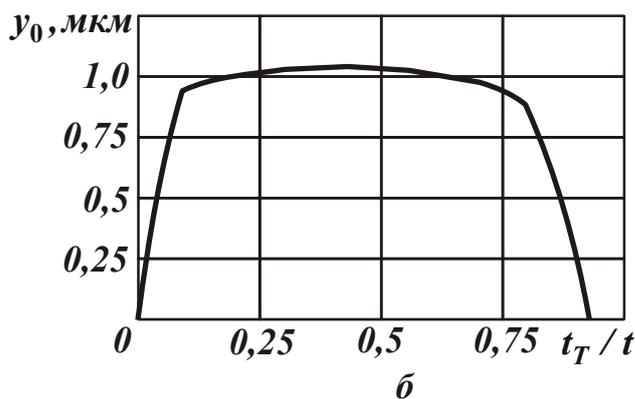
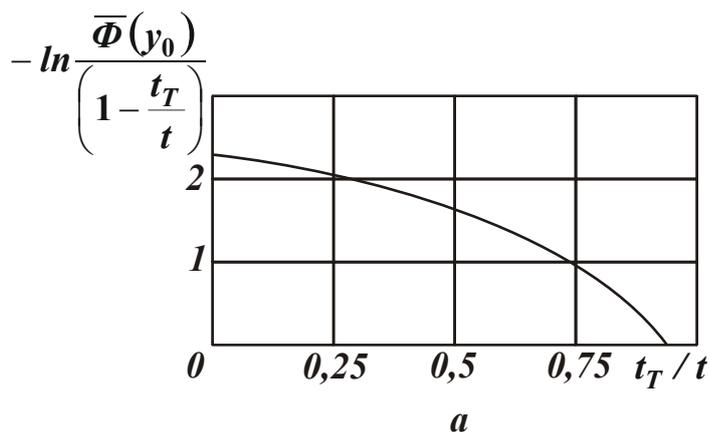


Рис. 3. Характер изменения функции $-\ln \frac{\bar{\Phi}(y_0)}{\left(1 - \frac{t_T}{t}\right)}$

(а) и параметра y_0 (б) от отношения t_T/t при шлифовании несплошного материала (наплавки).

параметр y_0 с увеличением отношения t_T/t непрерывно увеличивается, т.е. наибольшее значение y_0 достигается при $t_T/t=1$. В этом случае максимальное значение параметра y_0 на 30% превосходит максимальное значение параметра

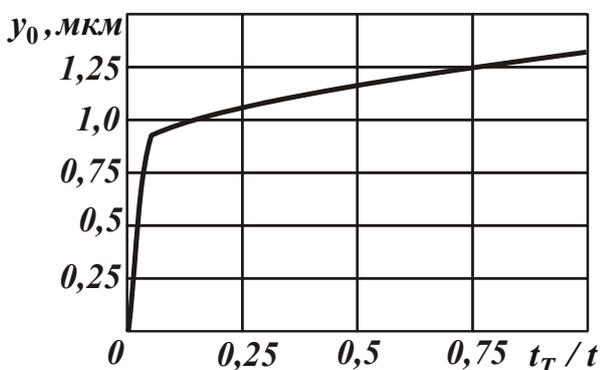


Рис. 4. Зависимость параметра y_0 от отношения t_T/t при шлифовании сплошного материала.

В табл. 1 и на рис. 3 приведены расчетные значения функции $\ln \frac{\bar{\Phi}(y_0)}{\left(1 - \frac{t_T}{t}\right)}$ и

параметра y_0 в зависимости от отношения t_T/t . Как видно, параметр y_0 изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку максимума при $t_T/t=0,4$. Для сравнения в табл. 2 и на рис. 4 приведены расчетные значения параметра y_0 для шлифования сплошного материала (т.е. при $B_\phi=0$), полученные на основе преобразованной зависимости (5) с учетом

$$\ln \frac{\bar{\Phi}(y_0)}{\left(1 - \frac{t_T}{t}\right)} = \ln \bar{\Phi}(y_0) = -2,3:$$

$$y_0^3 = 2,3 \cdot A \cdot \sqrt{\frac{t_T}{t}}. \quad (6)$$

Как следует из рис. 4, Как следует из рис. 4, параметр y_0 при шлифовании наплавленного материала, рис. 3 и табл. 1. Таким образом показано, что применяя схему однопроходного глубинного шлифования наплавленного материала, можно уменьшить максимальную толщину среза H_{max} , которая равна параметру y_0 при $t_T/t=0,4$. На рис. 5 показан характер распределения толщин срезов вдоль дуги контакта круга с обрабатываемой деталью при шлифовании сплошного и несплошного материала (наплавки).

Уменьшение максимальной толщины среза H_{max} при глубинном шлифовании потенциально позволяет увеличить производительность обработки и уменьшить энергоемкость обработки. Эффект достигается за счет увеличения скорости детали $V_{дет}$ при одном и том же значении $y_0 = H_{max}$. Вместе с тем, с увеличением производительности обработки увеличивается объем образующихся стружек, что требует увеличения объема межзеренного пространства круга с целью их свободного размещения. Поэтому при обработке наплавочных материалов, когда образуются длинные сливные стружки, важно обеспечить непрерывное поддержание высокой режущей способности круга за счет применения эффективных методов правки круга.

Как показано выше, максимальная толщина среза H_{max} при шлифовании наплавленного материала равна параметру y_0 при $t_T / t = 0,4$ (табл. 1). Тогда зависимость (4) с учетом $y_0 = H_{max}$ и $\ln \frac{\bar{\Phi}(y_0)}{\left(1 - \frac{t_T}{t}\right)} = -1,8$ опишется:

$$H_{max} = \sqrt[3]{\frac{75,6 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет}}{tg \gamma \cdot m \cdot V_{кр}}} \cdot \sqrt{\frac{t}{R_{кр}}} \quad (7)$$

Разрешая зависимость (7) относительно скорости детали $V_{дет}$, рассматривая вместо глубины шлифования t ее фактическое значение t_ϕ , имеем

$$V_{дет} = \frac{tg \gamma \cdot m \cdot V_{кр}}{75,6 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{R_{кр}}{t_\phi}} \cdot \left(\frac{H_{max}}{\bar{X}}\right)^3 \quad (8)$$

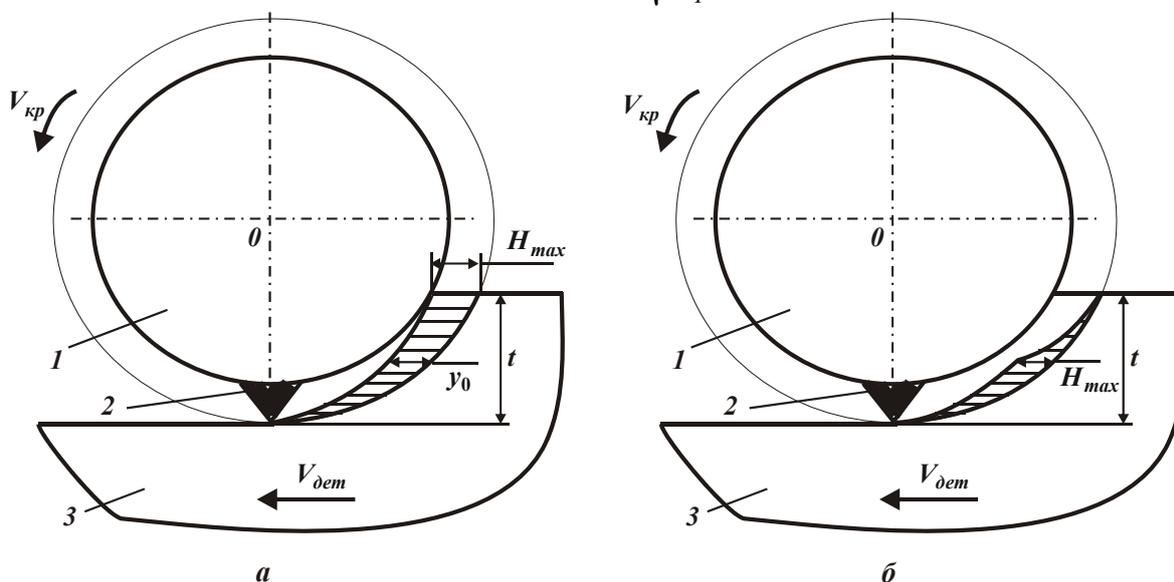


Рис. 5. Характер распределения толщин срезов вдоль дуги контакта круга с обрабатываемой деталью при шлифовании сплошного (а) и несплошного (б) материала (наплавки).

Соответственно, фактическая производительность обработки Q_ϕ определится:

$$Q_\phi = \frac{B \cdot tg \gamma \cdot m \cdot V_{кр} \cdot \sqrt{R_{кр}} \cdot t_\phi}{75,6 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{H_{max}}{\bar{X}}\right)^3 \quad (9)$$

В работе [4] приведена аналогичная зависимость для определения фактической производительности обработки Q_ϕ при шлифовании сплошного материала:

$$Q_\phi = B \cdot V_{дет} \cdot t_\phi = \frac{B \cdot tg\gamma \cdot m \cdot V_{кр} \cdot \sqrt{R_{кр} \cdot t_\phi}}{630 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{H_{max}}{\bar{X}} \right)^3. \quad (10)$$

Сравнивая зависимости (9) и (10), видно, что при шлифовании наплавленного материала, согласно зависимости (9), фактическая производительность обработки Q_ϕ (при одном и том же значении максимальной толщины среза H_{max}) более чем в 8 раз превышает производительность обработки при шлифовании сплошного материала.

Необходимо отметить, что выявленный эффект обработки возможен в случае применения схемы глубинного шлифования. При обычном многопроходном шлифовании, вследствие небольшой глубины шлифования и относительно большой скорости детали $V_{дет}$, обеспечить данный эффект обработки весьма сложно. Это связано, как отмечалось выше, со значительными динамическими нагрузками, возникающими в зоне обработки по причине шлифования прерывистой поверхности, интенсивного износа круга и снижения (и даже потери) его режущей способности.

Литература: 1. Рыжов Э.В., Клименко С.А., Гуцаленко О.Г. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями. – К.: Наук. думка, 1994. – 180 с. 2. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования. – Автореф. дис.... докт. техн. наук. – Одесса, 1995. – 36 с. 3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с. 4. Андилахай В.А. Обоснование технологических возможностей уменьшения энергоемкости обработки при шлифовании // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – “Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні”. – 2009. – Вип. 81. – С. 173-183.

УДК 621.923

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИЙ ШЛИФОВАНИЯ ПО КРИТЕРИЮ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ

Бережной Р.А. (г. Харьков, Украина)

On the basis of the analytical description of the elastic displacement, occurring in the technological system, made to optimize the structure and parameters of the grinding operations by the criterion of accuracy of processing.

Вопросы обеспечения высокоточной обработки деталей машин на операциях шлифования по-прежнему актуальны и требуют проведения дальнейших исследований [1]. В работе [2] предложен теоретический подход к определению оптимальной структуры и параметров операций шлифования по наименьшему основному времени обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности. На его основе получены важные решения, что открывает новые возможности интенсификации финишной обработки. Поэтому целью работы является теоретическое обоснование условий повышения точно-

сти и производительности обработки на операциях плоского и круглого наружного шлифования. Используя результаты исследований, приведенные в работе [3], рассмотрим баланс перемещений в технологической системе, описываемый уравнением:

$$t \cdot n = \int_0^n t_{\phi} \cdot dn + y, \quad (1)$$

где t, t_{ϕ} – соответственно номинальная и фактическая глубины шлифования, м; n – количество проходов круга; y – величина упругого перемещения, м [4]:

$$y = \frac{\sigma \cdot Q_{\phi}}{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}} = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{\text{дет}} \cdot t_{\phi}}{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}} = B_1 \cdot t_{\phi}, \quad (2)$$

σ – условное напряжение резания, Н/м²; $K_{\text{ш}} = P_z / P_y$ – коэффициент шлифования; P_z, P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н; c – приведенная жесткость технологической системы, Н/м; $Q_{\phi} = H \cdot V_{\text{дет}} \cdot t_{\phi}$ – фактическая производительность обработки, м³/с; H – ширина шлифования (высота круга), м; $V_{\text{кр}}, V_{\text{дет}}$ – скорости круга и детали, м/с; $B_1 = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{\text{дет}}}{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}}$ – безразмерный параметр.

Из зависимости (2) вытекает: $B_1 = \frac{y}{t_{\phi}} = \frac{t - t_{\phi}}{t_{\phi}} = \frac{t}{t_{\phi}} - 1$. По физической сути

безразмерный параметр B_1 определяет степень расхождения фактической и номинальной глубин шлифования. Параметр B_1 при $t \gg t_{\phi}$ может изменяться в широких пределах. Подставляя зависимость (2) в уравнение (1), получим

$$t \cdot n = \int_0^n t_{\phi} \cdot dn + \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{\text{дет}} \cdot t_{\phi}}{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}}. \quad (3)$$

Дифференцируя полученное уравнение (3) по переменной n , приходим к дифференциальному уравнению:

$$B_1 \cdot \frac{dt_{\phi}}{dn} + t_{\phi} = t. \quad (4)$$

Решение дифференциального уравнения для начального условия $y(n=0) = y_0$ (где y_0 – начальный натяг в технологической системе):

$$t_{\phi} = t + \left(\frac{y_0}{B_1} - t \right) \cdot e^{-\frac{n}{B_1}}, \quad (5)$$

$$y = B_1 \cdot t + (y_0 - B_1 \cdot t) \cdot e^{-\frac{n}{B_1}} = y_{\text{уст}} + (y_0 - y_{\text{уст}}) \cdot e^{-\frac{n}{B_1}}, \quad (6)$$

где $y_{\text{уст}} = B_1 \cdot t$ – величина упругого перемещения, возникающего в технологической системе в установившемся во времени процессе шлифования, м.

При условии $y_0 = 0$ зависимости (5) и (6) упрощаются и принимают вид

$$t_{\phi} = t \cdot \left(1 - e^{-\frac{n}{B_1}} \right); \quad y = y_{ycm} \cdot \left(1 - e^{-\frac{n}{B_1}} \right). \quad (7)$$

Как видно, с увеличением количества проходов круга n значения параметра t_{ϕ} асимптотически приближаются к номинальной глубине шлифования $t=1$ мм, рис. 1. При этом значения t_{ϕ} тем больше, чем меньше безразмерный

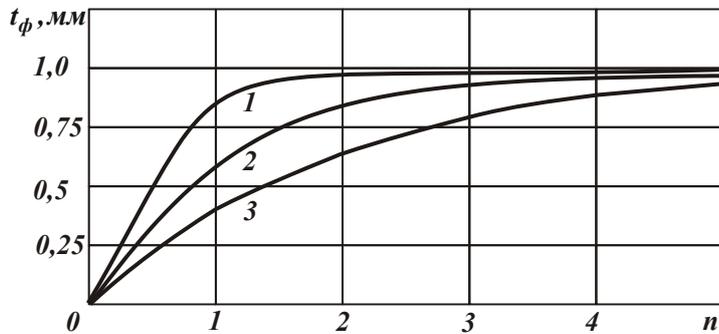


Рис. 1. Зависимость параметра t_{ϕ} от n : 1 – $B_1=0,5$; 2 – $B_1=1$; 3 – $B_1=2$.

параметр B_1 . На рис. 2 приведены расчетные значения величины y . В данном случае значения y изменяются аналогично значениям t_{ϕ} , увеличиваясь с увеличением безразмерного параметра B_1 .

При выхаживании, т.е. при шлифовании с отключенной радиальной подачей, величина $y_{ycm}=0$ и параметры t_{ϕ} и y описываются зависимостями:

$$t_{\phi} = \frac{y_0}{B_1} \cdot e^{-\frac{n}{B_1}}; \quad y = y_0 \cdot e^{-\frac{n}{B_1}}. \quad (8)$$

Параметр t_{ϕ} , характеризующий фактический съем обрабатываемого материала, с увеличением количества проходов круга n уменьшается по экспоненциальной зависимости, рис. 3. Фактическая глубина шлифования на каждом проходе круга равна разности значений $\Delta t_{\phi} = t_{\phi}(n-1) - t_{\phi}(n)$, рис. 4. Например, для $y_0=1$ мм; $B_1=0,5$; $n=1$, имеем: $\Delta t_{\phi} = 1 \text{ мм} - 0,135 \text{ мм} = 0,865 \text{ мм}$.

Величина упругого перемещения y , описываемая зависимостью (8), с увеличением количества проходов круга n уменьшается по закону изменения параметра t_{ϕ} (рис. 2), что очевидно способствует повышению точности размера обрабатываемой поверхности.

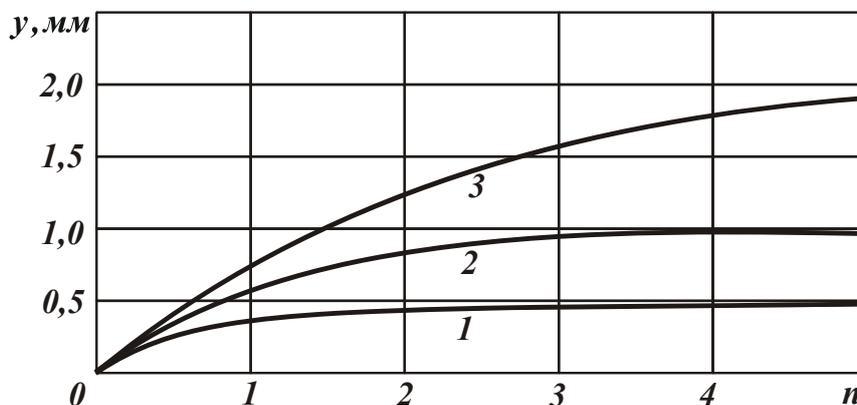


Рис. 2. Зависимость величины y от n : 1 – $B_1=0,5$; 2 – $B_1=1$; 3 – $B_1=2$.

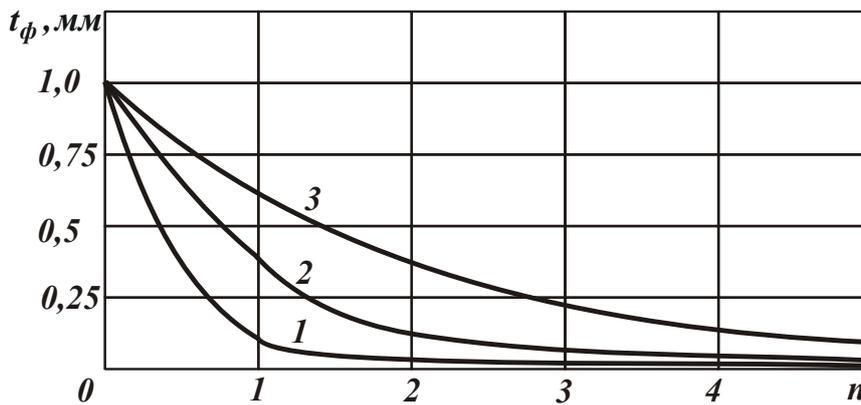


Рис. 3. Зависимость параметра t_ϕ от n при выхаживании: 1 – $B_1=0,5$; 2 – $B_1=1$; 3 – $B_1=2$.

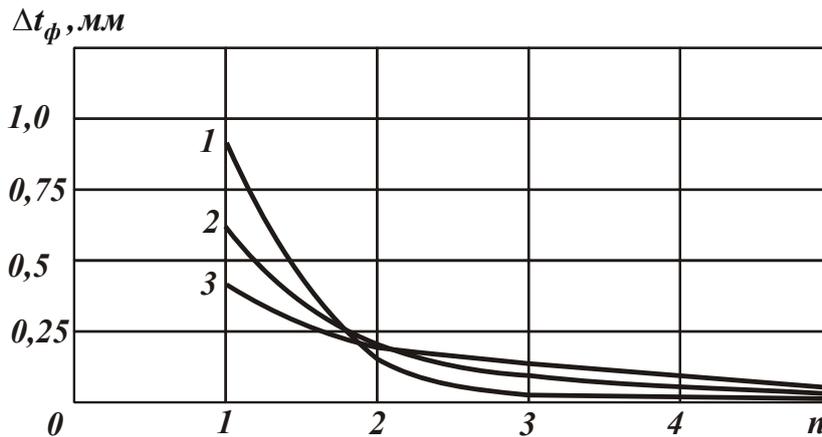


Рис. 4. Изменение фактической глубины шлифования Δt_ϕ по проходам круга n при выхаживании: 1 – $B_1=0,5$; 2 – $B_1=1$; 3 – $B_1=2$.

Учитывая важность исследования упругого перемещения, возникающего в технологической системе при плоском шлифовании на переходе выхаживания, рассмотрим дополнительно его упрощенный расчет. Предположим, что в системе создан начальный натяг величиной y_0 и шлифование производится с отключенной радиальной подачей станка, т.е. сьем материала происходит за счет возникающих в технологической системе упругих перемещений. Тогда на первом проходе круга (в продольном направлении) будет выполняться условие:

$$y_0 = t_1 + y, \quad (9)$$

где t_1 – глубина шлифования на первом проходе круга, м; y – величина упругого перемещения в технологической системе, определяемая зависимостью (2) с

учетом $Q_\phi = H \cdot V_{dem} \cdot t_1$, т.е. $y = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{dem} \cdot t_1}{c \cdot K_{ui} \cdot V_{кр}} = B_1 \cdot t_1$.

Разрешая зависимость (9) относительно t_1 с учетом $m_1 = \frac{1}{(1+B_1)}$, имеем

$$t_1 = \frac{y_0}{(1+B_1)} = y_0 \cdot m_1. \quad (10)$$

На втором проходе круга условие (9) видоизменится: $y_0 - t_1 = t_2 + y$ или $y_0 - t_1 = t_2 + m \cdot t_2$, где t_2 – глубина шлифования на втором проходе круга, м. Разрешая зависимость относительно t_2 , получим $t_2 = y_0 \cdot m_1 \cdot (1 - m_1)$.

На третьем проходе круга условие (9) опишется: $y_0 - t_1 - t_2 = t_3 + y$ или $y_0 - t_1 - t_2 = t_3 + m \cdot t_3$, где t_3 – глубина шлифования на третьем проходе круга, м. Разрешая зависимость относительно t_3 , имеем

$$t_3 = y_0 \cdot m_1 \cdot [1 - m_1 - m_1 \cdot (1 - m_1)] = y_0 \cdot m_1 \cdot (1 - m_1)^2. \quad (11)$$

Данное решение можно распространить для определения глубины шлифования t_n на n -ном проходе круга:

$$t_n = y_0 \cdot m_1 \cdot (1 - m_1)^{n-1}. \quad (12)$$

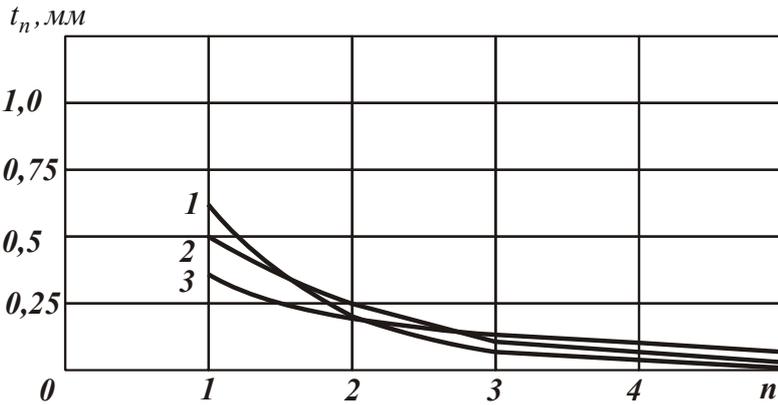


Рис. 5. Зависимость параметра t_n от n при выхаживании: 1 – $B_1=0,5$; 2 – $B_1=1$; 3 – $B_1=2$.

Как следует из рис. 5, с увеличением количества проходов круга n глубина шлифования t_n , рассчитанная по зависимости (12), уменьшается. Причем, характер изменения t_n с увеличением количества проходов круга n подчиняется закону бесконечно убывающей геометрической прогрессии со знаменателем $(1 - m_1)$.

Преобразуя зависимость (12), приходим к Биному Ньютона:

$$(1 - m_1)^n = 1 - n \cdot m_1 + \frac{n \cdot (n-1)}{1 \cdot 2} \cdot m_1^2 - \frac{n \cdot (n-1) \cdot (n-2)}{1 \cdot 2 \cdot 3} \cdot m_1^3 + \dots \quad (13)$$

Учитывая то, что $m_1 < 1$, а n – относительно большая величина, в разложении (13) преобладают первые слагаемые. Поэтому с достаточной для практики точностью можно принять:

$$(1 - m_1)^n \approx 1 - n \cdot m_1 + \frac{n^2}{1 \cdot 2} \cdot m_1^2 - \frac{n^3}{1 \cdot 2 \cdot 3} \cdot m_1^3 + \dots = e^{-n \cdot m_1} = e^{-\frac{n}{(1+B_1)}}. \quad (14)$$

Тогда зависимость (12) примет вид

$$t_n = \frac{y_0}{B_1} \cdot e^{-\frac{n}{(1+B_1)}} = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot H \cdot V_{дем}} \cdot y_0 \cdot e^{-\frac{n}{\left(1 + \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дем}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}\right)}}. \quad (15)$$

При условии $B_1 > 1$ зависимость (15) принимает вид зависимости (8):

$$t_n = \frac{y_0}{B_1} \cdot e^{-\frac{n}{B_1}} = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot H \cdot V_{дем}} \cdot y_0 \cdot e^{-\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot n}{\sigma \cdot H \cdot V_{дем}}}. \quad (16)$$

Следовательно, при условии $B_1 > 1$ упрощенное решение, описываемое зависимостью (15), и уточненное решение, описываемое зависимостью (8), совпадают. От зависимости (16) не сложно перейти к зависимости для определения производительности обработки:

$$Q_{\phi} = H \cdot V_{дет} \cdot t_n = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma} \cdot y_0 \cdot e^{-\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}} \cdot n} \quad (17)$$

Определим наименьшее основное время обработки при плоском шлифовании на переходе выхаживания с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности. Для решения задачи воспользуемся зависимостью

$$\tau = \tau_0 \cdot n, \quad (18)$$

где $\tau_0 = L / V_{дет}$ – время одного продольного хода круга, с; H, L – ширина и длина обрабатываемой детали, м; $V_{дет}$ – скорость детали, м/с.

Количество проходов круга n определим из зависимости (8), рассматривая в ней величину y в качестве заданной погрешности размера обработки:

$$n = B_1 \cdot \ln \frac{y_0}{y} \quad (19)$$

В табл. 1 приведены значения безразмерного параметра B_1 в зависимости от количества проходов круга n для различных значений $\varepsilon_{сум} = y_0 / y$ (с учетом $\ln 100 = 4,6$ и $\ln 10 = 2,3$). Очевидно, чем больше суммарное уточнение $\varepsilon_{сум} = y_0 / y$, тем меньше B_1 .

Таблица 1

Расчетные значения безразмерного параметра B_1

n	1	2	3	4	5
для $y_0 / y = 100$	0,217	0,434	0,652	0,869	1,086
для $y_0 / y = 10$	0,434	0,869	1,304	1,139	2,173

Подставим зависимость (19) в (18), с учетом параметра $B_1 = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$:

$$\tau = \frac{\sigma \cdot H \cdot L}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \ln \frac{y_0}{y} \quad (20)$$

Как видно, уменьшить основное время обработки τ можно повышением режущей способности круга за счет уменьшения отношения $\sigma / K_{ш}$, увеличением жесткости технологической системы c , скорости круга $V_{кр}$ и уменьшением ширины шлифования H и суммарного уточнения $\varepsilon_{сум} = y_0 / y$. Основное время обработки τ не зависит от скорости детали $V_{дет}$ и соответственно количества проходов круга n . Исходя из зависимости (8), это свидетельствует о том, что основное время обработки τ также не зависит и от фактической глубины шлифования t_{ϕ} . С учетом сказанного скорость детали $V_{дет}$ определяется из зависимости (19):

$$V_{дет} = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot H} \cdot \frac{n}{\ln \frac{y_0}{y}} \quad (21)$$

При $n=1$ величина начального натяга в технологической системе y_0 равна номинальной глубине шлифования t . Тогда зависимость (21) выразится

$$V_{дет} = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot H} \cdot \frac{1}{\ln \frac{t}{y}} \quad (22)$$

Как видно, основное время обработки τ тем меньше, чем больше жесткость технологической системы c , отношение $K_{ш}/\sigma$, скорость круга $V_{кр}$ и меньше ширина шлифования H и суммарное уточнение $\varepsilon_{сум} = y_0/y$. Выполнение условия $y_0=t=H$ предполагает реализацию схемы глубинного шлифования с относительно небольшой скоростью детали $V_{дет}$, т.к. с увеличением глубины шлифования t , согласно зависимости (22), скорость детали уменьшается. Следовательно, обеспечить заданную погрешность обработки y с одинаковой производительностью обработки можно как в условиях многопроходного ($n>1$), так и глубинного ($n=1$) шлифования. Однако при этом будут различны значения шероховатости поверхности, силы и температуры резания, себестоимость обработки. Поэтому выбор оптимального количества проходов круга n и соответственно оптимальной скорости детали $V_{дет}$ в данном случае необходимо устанавливать из условия обеспечения требуемого качества обработки (ограничения по температуре шлифования) или минимально возможной себестоимости обработки и т.д.

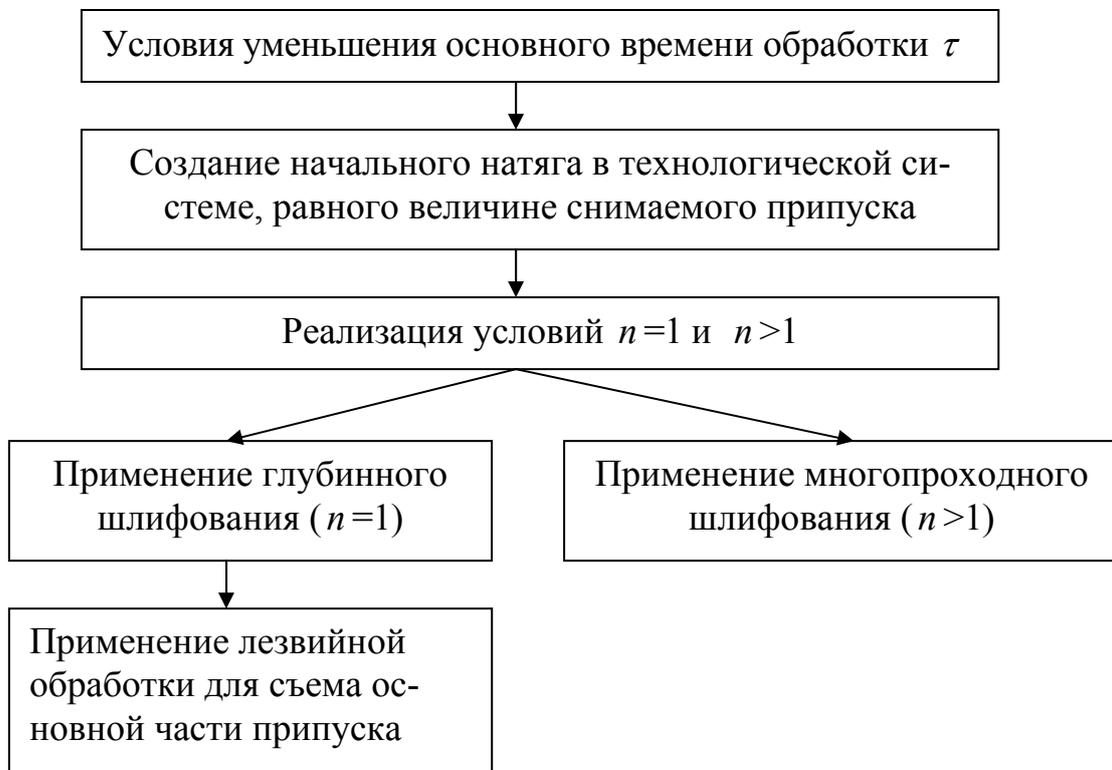


Рис. 6. Структурная схема условий уменьшения основного времени обработки τ .

Доказанная эффективность съема припуска за один проход круга указывает на то, что вместо шлифования можно использовать однопроходное резание лезвийным инструментом, обеспечивая при этом заданную точность обработки.

Кроме того, как известно, при резании лезвийным инструментом отношение $\sigma / K_{ин}$ (рассматривая $K_{ин} = P_z / P_y$ как коэффициент резания) меньше, чем при шлифовании, а это позволяет уменьшить основное время обработки τ и соответственно увеличить скорость детали $V_{дет}$ (в данном случае продольную подачу). Собственно этим можно объяснить то, что на практике при механической обработке основную часть припуска рекомендуется удалять с использованием лезвийных инструментов (на операциях предварительной обработки) и лишь весьма малую часть – с использованием абразивных инструментов (на операциях окончательной обработки) с целью устранения дефектного слоя и обеспечения высокого качества и шероховатости обрабатываемых поверхностей.

Таким образом, на основе полученного теоретического решения удалось, пожалуй, впервые определить оптимальную структуру съема припуска с точки зрения обеспечения максимально возможной производительности и заданной точности обработки с использованием абразивных и лезвийных инструментов. На рис. 6 представлена структурная схема условий уменьшения основного времени обработки τ с учетом ограничения по точности размера обработанной поверхности.

Определим наименьшее основное время обработки при плоском шлифовании по жесткой схеме. Полученное выше решение справедливо при условии создания в технологической системе начального натяга y_0 , равного величине снимаемого припуска Π . При невозможности выполнения этого условия,

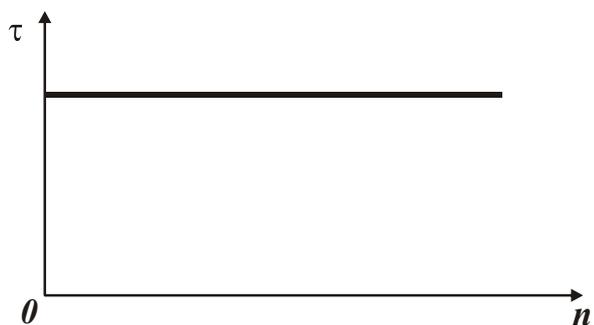


Рис. 7. Общий вид зависимости τ от n .

необходимо создавать в системе меньшие натяги. Однако это может привести к снижению производительности обработки. В связи с этим определим наименьшее основное время обработки τ при плоском шлифовании по жесткой схеме, не требующем создания в технологической системе значительных натягов. Для этого первоначально сравним зависимости (7) и

(8), описывающие величину упругого перемещения y при выхаживании и шлифовании по жесткой схеме при $n=1$ и $y_0 = t$. Представим зависимость (7):

$$y_{уст} \cdot e^{-\frac{1}{B_1}} = y_{уст} - y. \quad (23)$$

Разделим правую и левую части зависимости (23) на параметр B_1 . Поскольку $t - t_\phi = y$, то справедлива зависимость

$$y = t \cdot e^{-\frac{1}{B_1}}. \quad (24)$$

В результате пришли к зависимости (8) при $n=1$ и $y_0 = t$. Это указывает на то, что по физической сути зависимости (7) и (8) описывают один и тот же процесс формирования величины упругого перемещения y . Следовательно,

при плоском шлифовании нет необходимости создавать в технологической системе значительные натяги $y_0 = t$, достаточно шлифовальный круг после каждого продольного хода выводить из контакта с обрабатываемой деталью и съём припуска производить с заданной номинальной глубиной шлифования t по жесткой схеме. Определим основное время обработки τ при плоском шлифовании по жесткой схеме по зависимости (18).

Разрешим зависимость (7) относительно количества проходов круга n :

$$n = B_1 \cdot \ln \frac{1}{\left(1 - \frac{y}{y_{уст}}\right)}. \quad (25)$$

Тогда

$$\tau = \frac{L}{V_{дет}} \cdot n = \frac{\sigma \cdot H \cdot L}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \ln \frac{1}{\left(1 - \frac{y}{y_{уст}}\right)}. \quad (26)$$

Величина $y_{уст}$ равна

$$y_{уст} = B_1 \cdot t = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет} \cdot t}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} = \frac{\sigma \cdot Q}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} = \frac{\sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \frac{Q_{объем}}{\tau}, \quad (27)$$

где $Q = H \cdot V_{дет} \cdot t = \frac{Q_{объем}}{\tau}$ – номинальная производительность обработки, м³/с;

$Q_{объем} = H \cdot L \cdot \Pi$ – объем снятого материала, м³; Π – величина снимаемого припуска, м.

Как видно, величина $y_{уст}$ не зависит от скорости детали $V_{дет}$ и номинальной глубины шлифования t , а определяется производительностью обработки Q , которая в свою очередь равна отношению объема снятого материала $Q_{объем}$ и основного времени обработки τ . Из этого вытекает, что основное время обработки τ , определяемое уравнением (26), не зависит от скорости детали $V_{дет}$ и номинальной глубины шлифования t , а соответственно и от количества проходов круга n . Схемы многопроходного и глубинного (однопроходного) шлифования в данном случае равносильны. Они обеспечивают съём заданного припуска Π с одной и той же производительностью обработки Q и погрешностью обработки y . В итоге пришли к решению, описываемому зависимостью (20). Этим показано, что по производительности обработки (с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности) плоское шлифование по жесткой схеме и выхаживание равносильны. Однако, при выхаживании требуется создание в технологической системе значительного натяга, что не всегда практически выполнимо. При плоском шлифовании по жесткой схеме (в связи с периодическим выходом круга из контакта с обрабатываемой деталью) нет необходимости в создании значительных натягов. Поэтому данная схема более эффективна, о чем свидетельствует ее широкое применение на практике при съеме относительно больших припусков.

Определим окончательно основное время обработки τ , для чего подставим зависимость (27) в уравнение (26):

$$\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \tau}{\sigma \cdot H \cdot L} = \ln \frac{1}{\left(1 - \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \tau}{\sigma \cdot H \cdot L} \cdot \frac{y}{\Pi}\right)} \quad \text{или} \quad \frac{\alpha}{\varepsilon_{сум}} = 1 - e^{-\alpha}, \quad (28)$$

где $\alpha = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \tau}{\sigma \cdot H \cdot L}$ – безразмерный параметр; $\varepsilon_{сум} = \frac{\Pi}{y}$ – суммарное уточнение.

В итоге получено уравнение, содержащее неизвестный параметр α , который зависит лишь от суммарного уточнения $\varepsilon_{сум}$. В табл. 2 приведены расчетные значения α в зависимости от суммарного уточнения $\varepsilon_{сум}$. Как видно, с увеличением $\varepsilon_{сум} > 1$ параметр α непрерывно увеличивается.

Таблица 2

Расчетные значения α

α	0,1	0,5	1	2	3
$\alpha / \varepsilon_{сум}$	0,095	0,393	0,632	0,865	0,95
$\varepsilon_{сум}$	1,052	1,0272	1,582	2,312	3,157

Зная параметр α , можно определить основное время обработки τ (рис. 7):

$$\tau = \frac{\sigma \cdot H \cdot L \cdot \alpha}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} = B \cdot \alpha, \quad (29)$$

где $B = \frac{\sigma \cdot H \cdot L}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$.

Из зависимости (29) вытекает, что основное время обработки τ тем меньше, чем меньше параметр α и, согласно табл. 2, – меньше суммарное уточнение $\varepsilon_{сум}$. Таким образом показано, что основное время обработки τ определяется параметром B и величиной α , которая зависит от суммарного уточнения $\varepsilon_{сум}$. Скорость детали $V_{дет}$ и номинальная глубина шлифования t , а также количество проходов круга n не влияют на τ , т.е. с одинаковой эффективностью съем припуска можно производить как по схеме многопроходного, так и по схеме глубинного однопроходного шлифования. Предпочтение следует отдавать той схеме, для которой отношение $\sigma / K_{ш}$ (определяющее режущую способность круга) меньше. Таким образом, мы подошли к необходимости оценки отношения $\sigma / K_{ш}$ для разных схем обработки, включая резание абразивными и лезвийными инструментами.

В условиях неустановившегося во времени процесса плоского шлифования (рис. 1) с целью повышения производительности обработки целесообразно съем припуска производить при выполнении условия равенства номинальной и фактической глубин шлифования ($t = t_{ф}$). Исходя из зависимости (6), это достигается за счет исключения второго слагаемого (заключенного в круглые

скобки), т.е. выполнения условия $y_0 = y_{уст}$. Тогда зависимость (6) примет простой вид: $y = y_{уст}$. Это указывает на необходимость создания в технологической системе и постоянного поддержания в процессе шлифования установившегося натяга величиной $y_0 = y_{уст}$, что наиболее просто достигается путем применения упругой схемы шлифования с фиксированным радиальным усилием $P_0 = c \cdot y_0 = c \cdot y_{уст}$, где c – жесткость технологической системы, Н/м. В данном случае фактическая глубина шлифования будет всегда равна номинальной глубине шлифования, что позволит уменьшить основное время обработки τ .

Чтобы проверить правильность данного утверждения, определим основное время обработки по зависимости (18) при плоском многопроходном шлифовании по жесткой схеме с обеспечением заданного значения величины упругого перемещения y на каждом проходе круга $n = \Pi / t$. Величину y определим по (7) при условии $n=1$ с учетом $y_{уст} = B_1 \cdot t$ и зависимости (18):

$$\tau = \frac{\sigma \cdot H \cdot L}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \frac{\left(1 - e^{-\frac{1}{B_1}}\right)}{y}, \quad (30)$$

где $B_1 = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$.

Как следует из зависимостей (30), с увеличением безразмерного параметра B_1 и соответственно скорости детали $V_{дет}$ основное время обработки τ уменьшаются (при заданном значении y). Следовательно, с точки зрения уменьшения τ обработку эффективно вести по схеме многопроходного шлифования с увеличенным количеством проходов круга.

Как показано выше, для реализации данного решения необходимо в технологической системе создать и постоянно поддерживать натяг величиной $y_0 = y_{уст}$ (путем применения упругой схемы шлифования с фиксированным радиальным усилием $P_0 = c \cdot y_0 = c \cdot y_{уст}$) с целью обеспечения условия равенства номинальной и фактической глубины шлифования ($t = t_\phi$). В противном случае эффект обработки достигаться не будет, т.к. согласно зависимости (7), величина y с увеличением количества проходов круга n не остается постоянной, а непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к значению $y_{уст}$, рис. 2. В итоге приходим к тому, что наиболее оптимальной схемой шлифования, обеспечивающей наименьшее основное время обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности, является традиционно применяемое плоское многопроходное шлифование по упругой схеме с минимально возможной глубиной шлифования и максимально достижимой на станке скоростью детали $V_{дет}$.

К данному решению можно прийти другим путем, рассматривая зависимость (2) с учетом $t_\phi = t - y$. Тогда зависимость (2) примет вид

$$y = \frac{t}{\left(1 + \frac{1}{B_1}\right)}. \quad (31)$$

Как видно, с увеличением номинальной глубины шлифования t и безразмерного параметра B_1 (соответственно скорости детали $V_{дет}$) величина упругого перемещения y увеличивается. Разрешая зависимость (31) относительно производительности обработки $Q = H \cdot V_{дет} \cdot t$, имеем

$$Q = y \cdot \left(\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma} + H \cdot V_{дет} \right). \quad (32)$$

Увеличить Q при заданном значении y можно увеличением параметров $c, V_{кр}, H, V_{дет}$ и отношения $K_{ш} / \sigma$. Следовательно, с точки зрения повышения производительности обработки Q эффективно использовать схему плоского многопроходного шлифования с установлением максимально достижимой на станке скорости детали $V_{дет}$ (или продольной подачи). Номинальная глубина шлифования t при этом определяется зависимостью, вытекающей из (31):

$$t = \left(1 + \frac{1}{B_1}\right) \cdot y. \quad (33)$$

Очевидно, чем больше безразмерный параметр B_1 и соответственно скорость детали $V_{дет}$, тем меньше должна быть номинальная глубина шлифования t . Зависимость (32) можно представить в виде

$$Q = P_y \cdot \left(\frac{K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma} + \frac{H \cdot V_{дет}}{c} \right), \quad (34)$$

где $P_y = c \cdot y$ – радиальная составляющая силы резания, Н.

Из зависимости (34) следует однозначная связь между параметрами Q и P_y : большему значению P_y соответствует большее значение Q . Поэтому для стабильного обеспечения с течением времени обработки заданных значений Q и y процесс плоского шлифования эффективно осуществлять по упругой схеме с фиксированным радиальным усилием. В результате пришли к ранее установленному решению (30), что свидетельствует о достоверности выполненных расчетов.

На рис. 8 показана обобщенная структурная схема условий уменьшения основного времени обработки при плоском шлифовании с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности. Как показано выше, уменьшить основное время обработки τ можно тремя путями. Во-первых, за счет создания в технологической системе начального натяга, равного величине снимаемого припуска, и осуществления съема обрабатываемого материала по схеме выхаживания. В этом случае скорость детали не влияет на τ и ее выбор может быть произведен по другим технологически критериям. Например, по критерию обеспечения качества обработки (исключения прижогов, микротрещин и других температурных дефектов, образующихся на обрабатываемых поверхно-

стях), по критерию минимума себестоимости обработки и т.д. Во-вторых, за счет применения плоского многопроходного или глубинного (однопроходного) шлифования по жесткой схеме со скоростью детали (продольной подачей), определяемой из условия обеспечения заданной производительности обработки $Q = H \cdot V_{дет} \cdot t$. В-третьих, за счет применения плоского многопроходного шлифования по упругой схеме с фиксированным радиальным усилием $P_0 = c \cdot y_0 = c \cdot y_{уст}$, обеспечивающим выполнение условия $t = t_\phi$ за счет поддержания в процессе шлифования в технологической системе установившегося натяга $y_0 = y_{уст}$. Доказано, что данная схема шлифования обеспечивает наименьшее основное время обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности. Для ее осуществления необходимо устанавливать максимально достижимую на станке скорость детали (продольную подачу) и минимально возможную глубину шлифования.



Рис. 8. Структурная схема условий уменьшения основного времени обработки при плоском шлифовании.

Необходимо отметить, что эффективность обработки с увеличенными продольными подачами подтверждена практическими данными. В частности, получила достаточно широкое применение схема круглого наружного многопроходного шлифования с продольной осцилляцией круга. Однако данный эффект обработки объясняется стремлением к форсированному съему припуска у деталей, длины которых превышают ширину круга. В действительности, как показано выше, эффект обработки связан с другими более сложными закономерностями, выявление которых позволило теоретически определить оптимальные условия обработки.

Литература: 1. Лурье Г.Б. Шлифование металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 197 с. 2. Новиков Ф.В., Ковальчук А.И. Оптимизация структуры и параметров операций шлифования валов приводов шахтных конвейеров // Труды 14-й Международной научно-технической конференции. Физические и компьютерные технологии. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2008. – С. 3-13. 3. Новиков Ф.В., Бережной Р.А. Повышение точности и производительности механической обработки // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2009. – Вип. 81. – С. 29-38. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 7. ”Точность обработки деталей машин” – Одесса: ОНПУ, 2004. – 546 с.

УДК 621.923

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

Баталин А.С., Мануйленко В.М. (г. Симферополь, Украина)

We justify the main trends of high-speed machining.

Важным фактором повышения эффективности производства является применение методов высокоскоростной обработки. Наиболее широкое применение они получили в приборостроении: при производстве компонентов автомобилей, корпусов для приборов или медицинских устройств; в авиационно-космической промышленности; в инструментальном производстве: обработки при изготовлении пресс-форм для литья металлов, штампов, пресс-форм для литья пластмасс, графитовых и медных электродов для электроэрозионной обработки, моделей и прототипов матриц и пуансонов.

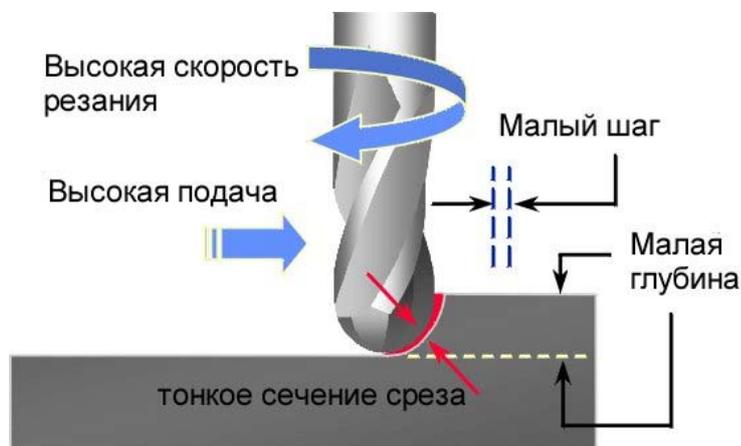


Рис. Принципиальная схема осуществления высокоскоростной обработки.

Высокоскоростная механическая обработка (англ. HSM – High Speed Machining) (BCO) – специальный термин, обозначающий современную технологию изготовления, которую можно отнести к группе технологических методов изготовления путем обработки материалов резанием резцами с определенной геометрией. По основному прин-

ципу он не отличается от обычного фрезерования, поскольку с помощью вращающегося режущего инструмента с несколькими определенными резцами (фрезами) снимается материал с заготовки. Однако при высокоскоростном фрезеровании скорости резания и подачи в 5-10 раз выше, чем при обычной обработке. При небольших сечениях среза, в данном диапазоне скоростей основная масса тепла концентрируется в стружке, не успевая переходить в заготовку. Именно это позволяет вести обработку закаленных сталей, не опасаясь отпуска поверхностного слоя. Отсюда основной принцип ВСО – малое сечение среза, снимаемое с высокой скоростью резания, и соответственно высокие обороты шпинделя и высокая минутная подача. Для такого материала, как сталь, они составляют обычно от 500 до 1500 м/мин и даже выше. Для наглядности можно привести пример, что фреза диаметром 6 мм имеет скорость вращения примерно 40000 об./мин. Такая высокая скорость резания комбинируется с высокими скоростями подачи, которые увеличиваются по сравнению с обычной обработкой в 5-10 раз и тем самым составляют от 2 до 20 м/мин. Однако есть области применения, где трудно достичь очень высоких скоростей. Тогда говорят о переходной области между высокоскоростным и обычным фрезерованием. Но и здесь можно использовать преимущества, которые дает стратегия высокоскоростной обработки.

Главный эффект ВСО – не уменьшение машинного времени за счет интенсификации режимов резания, а повышение качества обработки и эффективное использование современных станков с ЧПУ. Условием успеха в высокоскоростной обработке является правильный выбор всех составляющих факторов, участвующих в этом процессе – станок, система ЧПУ, режущий инструмент, вспомогательный инструмент с системой закрепления инструмента, система программирования, квалификация технолога программиста и оператора станка с ЧПУ. Пренебрежение одним из этих составляющих может свести к нулю все предыдущие усилия.

Основной принцип высокоскоростного фрезерования состоит в том, что при очень высокой скорости резания происходит значительное увеличение температуры в зоне резания, и обрабатываемый материал становится мягче. Высокоскоростное фрезерование базируется, прежде всего, на уменьшении количества тепла, возникающего при обработке резанием, которое снижает стойкость инструмента. Для получения детали точной заданной формы в процессе окончательной чистовой обработки режимы резания необходимо выбирать таким образом, чтобы обеспечить минимально возможный перенос тепла резания в обрабатываемую деталь. При выборе оптимальных режимов резания можно обеспечить такие условия обработки, при которых температура поверхности резания соответствует начальной температуре. Именно поэтому обращаются к высокоскоростной обработке. При этом глубина резания не должна превышать 10% диаметра фрезы, что позволяет вести лезвийную обработку закаленных сталей, обеспечивая высокое качество поверхности, соизмеримое с электроэрозионной обработкой.

При обычной обработке с увеличением скорости резания и уменьшением толщины стружки непрерывно повышается температура обрабатываемой заго-

товки, стружки и инструмента. Но если повысить скорость подач в 5-10 раз, как это имеет место при высокоскоростном фрезеровании, то температура резания повышается лишь незначительно. Это связано с тем, что скорость подачи превышает скорость теплопроводности обрабатываемого резанием основного материала. Фреза «опережает» распространение тепла. Тем самым распространение тепла, образующегося в зоне контакта, в основной металл заготовки и фрезы, большей частью предотвращается, а основная доля тепла от резания отводится со стружкой. За счет этого значительно увеличивается стойкость инструмента. Исследования японских специалистов показали, что во время выполнения ВСО 75% произведенного тепла отводится со стружкой, 20% - через инструмент, и 5% - через обрабатываемую деталь. Деталь в процессе резания нагревается незначительно, что положительно влияет на точность обработки. На основании исследований обработки материалов повышенной прочности и твердости получены уравнения, с помощью которых можно рассчитать температуру поверхности резания детали в зависимости от режимов резания. Температура поверхности резания определяет также величину и направление остаточных напряжений в поверхностном слое детали после её обработки. Так высокие тепловые нагрузки обуславливают возникновение напряжения растяжения в обработанной поверхности, что, в свою очередь, может привести к возникновению волосяных трещин в поверхности детали.

Методы высокоскоростной обработки наиболее эффективно применять в инструментальном производстве для обработки при изготовлении пресс-форм для литья металлов, пресс-форм для литья пластмасс, поскольку формообразующие детали (матрицы и пуансоны) изготавливаются, как правило, из монолитного металла за одну установку. Эти методы также эффективно использовать для обработки штампов при изготовлении деталей сложной формы. Благодаря высокоскоростному фрезерованию по сравнению с обычным фрезерованием существенно уменьшается основное технологическое время – в 5-10 раз (при прочих равных условиях резания). Однако при изготовлении инструментов, где требуется производство сложных форм, применяется другая стратегия. Во избежание дорогостоящей, малопродуктивной ручной обработки при фрезеровании уменьшают формат строки, т.е. расстояние между двумя параллельными, расположенными рядом друг с другом траекториями движения центра фрезы.

Одним из преимуществ высокоскоростной обработки является работа в надкритических диапазонах колебаний, так как скорости вращения значительно превышают резонансные частоты детали, инструмента и компонентов станка. При этом, за счет небольших поперечных сечений среза, силы резания могут быть небольшими. Но высокоскоростное фрезерование обладает и недостатками, т.к. необходимо использовать специальные высокоскоростные инструментальные шпиндели и инструменты диаметром от 15 до 20 мм.

Стратегия обработки. Первое правило – режем тонко, но быстро, т.е. необходимо работать с малыми сечениями среза и большой скоростью резания. Это основа высокоскоростной обработки, реализуется простым заданием малых шагов между проходами, кроме случаев врезания, когда обработка осуществляется на проход на полную ширину фрезы. Такие случаи надо исключать за счет

использования трохоидальной обработки, когда фреза движется в процессе врезания по окружности, в конечном счете, осуществляя врезание, рис. 2. Идеальным является случай, когда САМ-система сама строит трохоиду в местах, где надо осуществить врезание. Такая стратегия используется и при формировании пазов, которые ранее обрабатывались за один ход фрезы того же диаметра, что ширина паза.

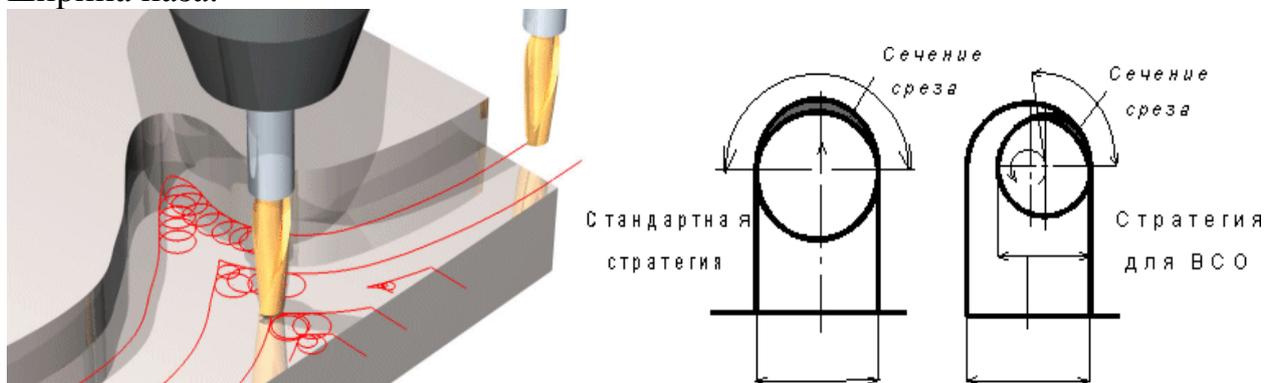


Рис. 2. Траектории движения инструмента.

Значительны проблемы высокоскоростной обработки отверстий в закаленных заготовках вследствие низкой стойкости сверл. В этом случае эффективным способом может быть спиральная расфрезеровывание отверстий. Причем, как показывает практика, этот метод как по производительности, так и по стойкости инструмента превосходит сверление. Следует отметить, что объем программ для ВСО значительно превосходит объемы традиционных программ силового резания, вследствие чего системы ЧПУ должны быстро обрабатывать программы, составляющие десятки мегабайт. Большие объемы программ требуют соответственно больших затрат времени на расчет траектории и здесь на первый план выходит скорость расчета, которую обеспечит САМ система. При разработке своей системы PowerMILL фирма Delcam уделяла этому особое внимание и на сегодняшний день она является явным лидером по времени расчета и пересчета программ.

Второе правило ВСО – борьба с углами, т.е. обеспечение гладкой траектории движения инструмента. Оно вытекает из необходимости снижения динамических нагрузок во время резкой смены направления движения инструмента. Надо максимально возможно исключить углы на траектории. В углах, где инструмент

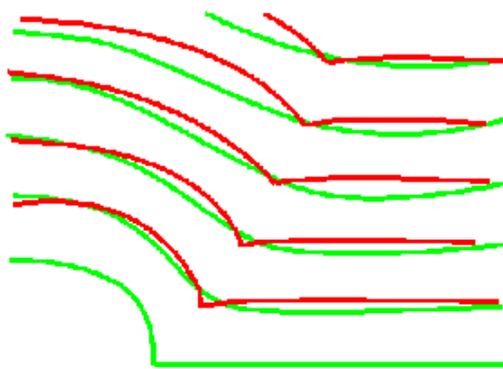
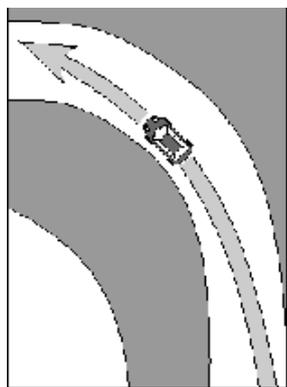


Рис. 3. Создание гладких траекторий движения инструмента.

меняет направление, он вынужден остановиться. Снижение нагрузки в этот момент вызывает врезание фрезы в тело детали и как следствие на поверхности детали остаются следы.

Создание гладких траекторий – это функ-

ция САМ-системы, например PowerMILL. Для создания гладких траекторий реализуется тот же алгоритм сглаживания, который выполняет гонщик, проходя крутые виражи, рис. 3.

Третье правило – обеспечение равномерной нагрузки на инструмент. Традиционная строчная обработка, состоящая из многочисленных ходов врезания и выходов инструмента, даже если это сглаженные входы по дуге, не может быть признана оптимальной для ВСО. Предпочтение должно отдаваться спиральным стратегиям, где инструмент однажды врезавшись, сохраняет непрерывный и равномерный контакт с заготовкой, или стратегиям эквидистантного смещения контура, которые сохраняют контакт инструмента с заготовкой длительное время – с одним заходом и выходом. Это же правило равномерных нагрузок диктует технику обработки внутренних скруглений. При ВСО надо стремиться исключать обработку фрезами с радиусами, равными радиусам скругления на детали. Как видно из рис. 4, в местах скруглений это вызывает резкое увеличение сечения среза и соответственно нагрузки на инструмент и его поломку именно в этих местах. Правда, это заставит моделировать все радиусы скругления на компьютерной модели, тогда как раньше, экономя время, радиусы не моделировались, а формировались геометрией фрезы. Отсюда одним из требований к системам моделирования должно быть требование легкого и надежного моделирования радиусов скругления. САМ-система для ВСО должна обеспечить: широкий набор вариантов гладкого подвода-отвода и связей между проходами; набор стратегий спиральной и эквидистантной обработки зон как на чистовой, так и на черновой обработке и поиск оптимальной стратегии в различных зонах обработки; автоматическое сглаживание траекторий в углах; исключение проходов полной шириной фрезы и автоматическое применение трохоидального врезания в этих местах; оптимизацию подач для сглаживания нагрузки на инструмент. В заключение можно сказать, что успех внедрения ВСО находится в руках технолога-программиста, хорошо владеющего САМ-системой, ведь программы для ВСО значительно сложнее, чем при традиционной обработке, хотя бы потому, что инструмент делает большее число ходов и требует специальных технологий подвода-отвода, обхода углов и сглаживания

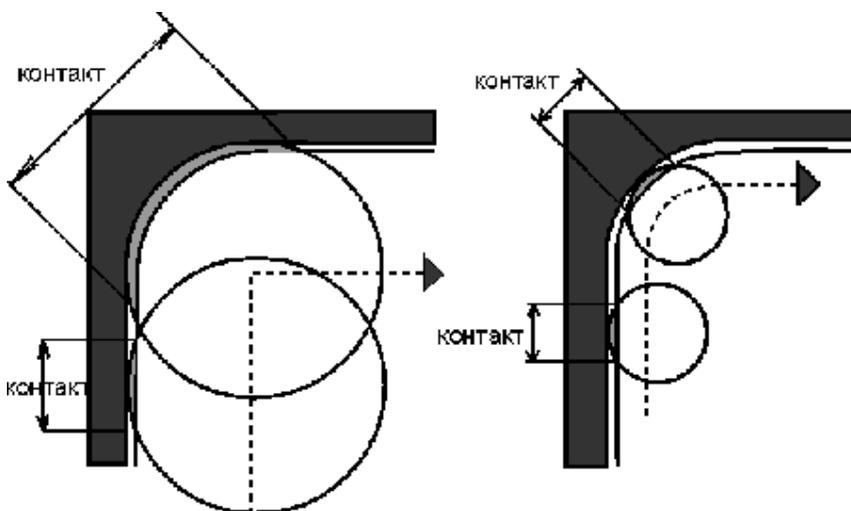


Рис. 4. Схемы обработки.

нагрузки на инструмент, и кроме того повышенная производительность станков требует ускорения подготовки программ. Отметим положительный фактор, что ВСО заставила обратить внимание на качество траектории инструмента. Внедрение новых подходов и стратегий, разработанных

для ВСО, в обычную обработку благоприятно скажется на качестве обработки и уменьшит вероятность поломки инструмента. Освоение технологий высокоскоростной обработки позволит вести обработку с таким качеством, которое может исключить финишные операции ручной полировки.

Современные инструментальные материалы. Наиболее широко применяются твердые сплавы, состоящие из карбидов вольфрама WC (с добавками карбида титана TiC, карбида тантала TaC, или карбида ниобия NbC для улучшения термической устойчивости и замедления диффузии) и связывающих материалов, как правило, с применением кобальта Co. В последние годы были разработаны многочисленные новые сплавы с целью улучшения определенных свойств, например, твердости, прочности при сжатии и изгибе, модуля упругости и др. Наиболее важной новейшей разработкой для повышения твердости у твердых сплавов WC-Co являются особо и ультрамелкозернистые твердые сплавы с зёрнами WC размером от 0,8 мкм или 0,5 мкм и содержанием Co в пределах 6-16% по массе. Производство высококачественных ультра-мелкозернистых сплавов стало возможным благодаря тому, что производителями материалов были разработаны порошковые материалы соответствующего размера, формы зёрен и распределения зёрен по крупности.

Заслуживает внимания то, что у тонкозернистых порошков с точки зрения размера и формы зёрен едва заметны различия между разными карбидами и Co. Все частички особо мелкозернистых твердых сплавов в отличие от стандартного сырья имеют более или менее круглую форму, что не только благоприятно сказывается на равномерной структуре спекаемого материала, но и на возможности формования.

Порошкообразный материал WC преимущественно производится традиционным путем редукции паравольфрамата аммония, оксида аммония или кислоты аммония, последующего смешивания вольфрамовой стали с углеродом и карбюрации смеси под водородом при 1400⁰C и 2000⁰C. Самые мелкозернистые виды порошков, изготовленных таким образом, имеют при рассматривании под растровым электронным микроскопом размер зёрен около 0,2 мкм. Возможность дальнейшего уменьшения размера зёрен заключается в прямой карбюрации WO₃ и C. Еще один успешный метод изготовления чрезвычайно мелкозернистого порошка состоит в преобразовании солей металлов. При этом методе предшественник Co-W в воде смешивается с вольфрамовой кислотой и сушится распылительным методом. Затем гранулят преобразуется в реакторе псевдоожижения при температуре ниже 1000⁰C в смеси WC-Co с частицами размером несколько нанометров (процесс S конверсии). С помощью описанных выше порошков WC (диаметр зёрен 0,2 мкм) удалось изготовить твердые сплавы с размером зёрен WC от 0,2 мкм до 0,3 мкм.

Наряду с использованием мельчайших порошков при производстве особо и ультра-мелкозернистых твердых сплавов большое значение имеет соответствующее введение добавок для торможения роста зёрен, как, например, VC, Cr₃C₂ (Ta, Nb)C. Из этих карбидных добавок в отношении торможения добавка VC самая действенная и приводит к особо высокой твердости и тем самым к

абразивной устойчивости. Воздействие добавок Cr_3C_2 на твердость, напротив, невелико. Преимущества добавки Cr_3C_2 заключаются, прежде всего, в том, что с ее помощью можно достигать особенно равномерной структуры с хорошей прочностью на излом. $(\text{Ta}, \text{Nb})\text{C}$ ведет также к созданию сплавов с хорошей вязкостью. Однако отрицательным является здесь уменьшение прочности на изгиб с увеличением концентрации.

Поскольку процесс роста кристаллов при агломерации начинается еще до начала жидкой фазы, важно уже на подготовительной стадии позаботиться о равномерном распределении элементов торможения роста зерен. На продвинутой стадии процесса агломерации, в конечном итоге, гомогенное распределение Co помогает равномерной готовности добавок карбида. Их концентрация насыщения в связующей фазе может быть достигнута точным контролем общего содержания углерода. Механизмом препятствия росту зерен считается то, что карбиды добавки во время процесса агломерации блокируют активные центры роста кристаллических зерен WC и тем самым нарушают процессы растворения и осаждения WC . Эффективность карбида тем больше, чем выше его концентрация и подвижность в связующей фазе. Превышение границ отделяемости карбидов добавки в связующей фазе не имеет дальнейшего воздействия на рост зерен.

Градиентные твердые сплавы. Применение твердых сплавов часто требует многообразной функциональности материала. Если в одном месте, например, поверхность инструмента подвержена износу, другие места подвержены изгибу, давлению и т.д. Эта проблема привела к разработке так называемых градиентных твердых сплавов, или материалов с функционально переменной структурой FGM на основе $\text{WC} - \text{Co}$ с добавками TiC и/или TaC , у которых состав или микроструктура локально различается. Эта концепция позволяет производить твердые сплавы с контролируемыми вариациями структурных, термических и функциональных свойств. Возникающие при охлаждении расплава спекания напряжения, ввиду разности термических коэффициентов расширения отдельных компонентов, могут очень хорошо затухать из-за последовательных переходов в микроструктуре. Изготовление градиентных структур осуществляется с управлением диффузии в контролируемой газовой атмосфере в процессе спекания, причем образование градиентных пограничных зон сильно зависит от состава, т.е. от количества добавок TiC / TaC . Твердые сплавы с градиентами 2 типа уже сегодня находят коммерческое применение в качестве субстрата разных сортов твердых сплавов с покрытием для улучшения вязкости. Другие градиентные структуры в настоящее время интенсивно изучаются с точки зрения их возможностей при обработке резанием.

Керметы. Они, в принципе, имеют такую же структуру, как и обычные твердые сплавы. Содержат различные твердые частицы в связующей матрице из Co и Ni . Высокопрочные компоненты состоят не из WC и $(\text{Ti}, \text{Ta}, \text{W})\text{C}$, а из карбо-нитридов титана Ti с различным содержанием Ta , W и при необходимости Mo . В структуре обычных твердых сплавов смешанные карбиды титана присутствуют в круглой форме, карбиды вольфрама – в многогранной форме. Структура керметов имеет исключительно круглую форму зерен карбонитридов титана, причем для этих частиц твердых материалов характерна ядерно-

периферийная структура. Вязкость современных керметов, содержащих азот, сопоставима с обычными P- твердыми сплавами. Поистине выдающейся является неокисляемость керметов.

Твердые сплавы с покрытием. Техника нанесения покрытий сегодня располагает различными способами. С точки зрения техники процесса для них характерны такие параметры, как способ осаждения, температура и давление. Возможные многослойные материалы различаются по твердости, неокисляемости и коэффициенту трения и в соответствии с этим имеют предпочтительные области применения. При высоких температурах процесса технологии CVD (1000 – 1100°C) из-за напряжения натяжения в слое ухудшается вязкость твердого сплава. С другой стороны, покрытие методом CVD позволяет осаждение очень толстых слоев. Технологическими методами нанесения покрытий (PVD и плазменным CVD), протекающими при более низких температурах (400–500°C), твердые сплавы, напротив, могут быть покрыты без потерь вязкости. С учетом высокой неокисляемости и износостойкости, а также низкого коэффициента трения многослойные покрытия CVD с минералокерамическими компонентами дают выгодные преимущества. Многослойное строение оказывает благоприятное воздействие на соотношение трения в пределах одного слоя, а также между слоями и субстратом. Многослойные структуры состоят из комбинации обычных твердых материалов, таких, как TiC, TiN, Ti(C,N) и Al₂O₃. Подобные покрытия могут быть иногда из 10 и более слоев, причем соответствующие отдельные слои отчасти тоньше 0,2 мкм. Они имеют при высокой скорости резания и тем самым высоких температурах хорошую износостойкость. Находят применение преимущественно при токарной обработке стали, стального литья и чугуна при высочайших скоростях резания. С точки зрения теплоизоляции для сухой обработки при высоких скоростях резания предпочтительными являются толстые слои с содержанием Al₂O₃. Дальнейшее развитие технологии нанесения покрытий CVD идет по направлению к более толстым многослойным конструкциям и многокомпонентным слоям. Для компенсации отрицательного воздействия напряжений при растяжении они, как уже упоминалось выше, комбинируются с субстратами из градиентного твердого сплава. Это твердые сплавы, которые имеют пограничные зоны толщиной до 40 мкм, свободные от карбидных смесей и/или обогащенные кобальтом. Все чаще используемым дополнением к обычной технологии CVD является техника средних температур MT-CVD для осаждения карбонитридных слоев. Температура осаждения здесь составляет около 800-900°C.

Особым признаком этих титаново-циркониевых карбо-нитридных слоев является то, что они могут осаждаться с различной кристаллографической ориентацией (текстурой) в зависимости от выбора предшественников. Исследования стойкости при резании показали, что текстура имеет значительное воздействие на возможности материала. Дальнейшее улучшение возможностей может быть достигнуто за счет использования четверичных материалов покрытия, например (Ti, Zr) (C,N) или (Ti, Hf)(C,N). Свойства этих слоев первоначально были исследованы в методе PVD, т.к. осаждение этих соединений по методу CVD представляло большие сложности. Между тем процессом, подобным про-

цессу осаждения Zr (C,N), удалось упомянутые выше четверичные системы осаждать по методу CVD. Дальнейший материал с многослойной структурой, имеющий большие возможности, – это соединение $Al_2O_3/ZrO_2/TiO_x$, которое изготавливается путем одновременного осаждения Al_2O_3 , ZrO_2 и малых количеств TiO_x . При этом моноклинный ZrO_2 в тонкодисперсном состоянии находится в матрице Al_2O_3 . Исследования влияния покрытий на износ керметов показали, что полностью потенциал возможностей может быть использован только при толстых износостойких слоях. Имеющиеся сегодня на рынке керметы с износостойкими слоями наносятся методом PVD или PCVD, т.к. имеющийся в составе связующего Ni при методе CVD создает технические проблемы. Однако толщина слоев относительно мала. Между тем, удалось также методом CVD наносить толстые многослойные покрытия с хорошей сцепляемостью.

УДК 621.92

КОНЕЧНО-РАЗНОСТНАЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЗАНИЯ АБРАЗИВНЫМИ ЗЕРНАМИ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

Сизый Ю.А., докт. техн. наук, **Сталинский Д.В.**, докт. техн. наук,

Ушаков А.Н., канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)

The paper shows the finite-difference thermal model of cutting abrasive grains of the grinding wheel.

Введение

В работах [1,2] рассмотрено аналитическое решение задачи теплопроводности при резании единичным абразивным зерном. В [1] решается плоская задача теплопроводности с источником тепла от работы деформации в виде плоскости сдвига наклонной к направлению ее движения под углом сдвига, а в [2] решается одномерная задача теплопроводности, в которой абразивное зерно неподвижно, а движется обрабатываемая поверхность со скоростью резания и представлена она как совокупность адиабатических стержней. Результаты обоих решений хорошо стыкуются как качественно, так и количественно. Однако, использование этих решений, и в частности согласно [2], для моделирования температуры обрабатываемой поверхности при многократном последовательном резании зернами след в след выявило существенные недостатки. Первое – очень большое время моделирования. Вторым существенным недостатком является то, что учесть изменение теплофизических свойств обрабатываемого материала с изменением температуры является практически невозможным. В работе Корчака С.Н. [3] делается попытка учесть этот фактор введением кусочно-непрерывных функций. Однако в работе [3] не учтено изменение свойств обрабатываемого материала на плоскости сдвига в связи с его нагревом при прохождении через эту плоскость. Кроме этого никто из авторов, исследовавших многократные резания зернами след в след не учитывал, то что каждое режущее зерно до входа в зону резания совершает оборот вместе с кругом и естественно успевает охладиться практически до комнатной температуры. Поэтому тепловой поток, выделенный на плоскости сдвига более интенсивно устремляется в охлажденное зерно, чем в обрабатываемую поверхность. Не учитывалось

также тепло уносимое стружкой. Учитывая сказанное, в настоящей статье рассматривается моделирование температурного поля при резании абразивным зерном методом конечных разностей в пакете визуально-блочного математического моделирования "VisSim", предназначенного для моделирования динамических систем [4]. Теплофизическая модель в конечных разностях в пакете "VisSim" получается достаточно громоздкой, однако малое машинное время моделирования (менее 3 минут для современного двухядерного персонального компьютера), возможность учитывать изменения свойств материала и охлаждение зерен, на каждом шаге интегрирования с возможностью оперативного изменения всех исходных параметров модели, многократно искупает затраты времени на ее создание.

Схематизация процесса резания абразивным зерном и математическая постановка задачи теплопроводности

Также как и в работе [2], схема процесса резания абразивным зерном имеет вид, показанный на рис.1.

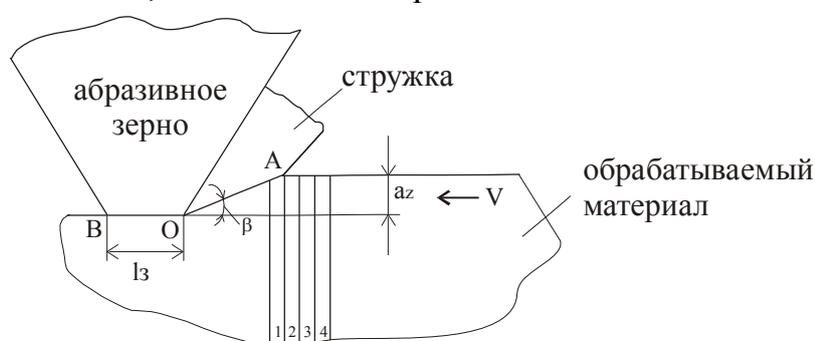


Рис. 1. Схема процесса резания абразивным зерном.

На этом рисунке обрабатываемый материал – набор тонких стержней 1, 2, 3, 4, Абразивное зерно неподвижно, а движется со скоростью резания обрабатываемый материал. Стержень принимаем адиабатическим, что обосновывается в работе [2].

Когда стержень 1 выйдет на плоскость сдвига, следом которой на рис.1 является плоскость OA, то этот стержень продлевается вверх удаляемым в виде стружки материалом и зерном, а вниз – обрабатываемым материалом. При этом стержень можно принять бесконечным в обе стороны от плоскости сдвига, т.к., учитывая очень малое время действия источника тепла, оно успевает нагреть очень короткие участки стержня, соизмеримые с размером зерна, что в дальнейшем будет подтверждено.

Таким образом, задача теплопроводности сводится к ее решению в адиабатическом стержне с движущимся вдоль него источником тепла (плоскостью сдвига) от работы деформации, а затем, после прохождения стержнем точки O и прекращения действия работы деформации, начинает действовать источник тепла от работы трения на площадке износа, но уже неподвижный вдоль стержня.

Когда стержень, двигаясь в направлении вектора V минует точку B, то из бесконечного он превратится в ограниченный, т.е. будет продлеваться только обрабатываемым материалом вниз. Однако и в эту фазу его движения до встречи со следующим зерном, режущим вслед предыдущего, стержень можно принять бесконечным. Это требует строгого объяснения, которое нами получено в предыдущих исследованиях [2]. Оно состоит в следующем.

Когда стержень выходит на площадку износа зерна, тепло преимущественно накопившееся в стружке и зерне, растекается по стержню и через очень

короткое время, значительно меньшее времени движения через площадку износа, устанавливается симметричное распределение температурных полей относительно поверхности обработки (линии ВО). Поэтому диффузия (растекание) тепла в тонком стержне воспроизводит остывание поверхности без учета теплоотвода ее охлаждением, что близко к условиям шлифования. Именно при шлифовании охлаждающая жидкость почти не проникает в межзеренное пространство на поверхности контакта круга с обрабатываемым материалом. Поэтому охлаждением воздухом или СОЖ при движении обрабатываемой поверхности от зерна к зерну можно пренебречь, учитывая ее малую интенсивность по сравнению с охлаждением теплопроводностью.

И последнее, что необходимо отметить, стержень принимается однородным, т.к. теплофизические свойства электрокорунда и стали близки, что уже анализировалось в работах [1, 2]. Таким образом, вся "история" нагрева поверхности обрабатываемого материала при последовательном след в след резании абразивными зернами это: 1) нагрев адиабатического стержня движущимся вдоль него источником тепла от работы деформации сосредоточенного на плоскости перпендикулярной стержню; 2) затем прекращение действия движущегося источника тепла после выхода стержня на площадку износа зерна и начало действия источника тепла от работы трения на плоскости в стержне, на которой действовал источник тепла от работы деформации; 3) прекращение действия источника тепла от работы трения и охлаждение с отсутствием теплоотвода на плоскости, в которой действовал источник тепла от работы трения. Последняя фаза в "истории" нагрева и охлаждения поверхности продолжается до подхода следующего зерна.

Если источник тепла, сначала от работы деформации поместить в начало координаты X , которую, направив вдоль стержня в сторону обрабатываемого материала, и систему координат перемещать вместе с источником вдоль стержня, то математическая постановка задачи будет следующей:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} \left(a(T) \frac{dT(x,t)}{dx} \right) + V \frac{dT(x,t)}{dx}, \quad (1)$$

$$T(\pm \infty, t) = 20^\circ C; \quad T(x, 0) = 20^\circ C \quad (2)$$

$$q(0,t) = \begin{cases} q_p, & \text{если } \tau_p \cdot i < t \leq \tau_{mp} \cdot i + \tau_1; \\ q_{mp}, & \text{если } \tau_{mp} \cdot i + \tau_1 < t \leq \tau_{mp} \cdot i + \tau_1 + \tau_2; \\ 0, & \text{если } \tau_{mp} \cdot i + \tau_1 + \tau_2 < t \leq \tau_{mp} \cdot (i+1); \end{cases} \quad (3)$$

где $i = 0, 1, 2 \dots n$; $T(x, t)$ – температура, как функция координаты X и времени t ; $\lambda(T)$, $a(T)$ – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности; q_p – тепловой поток от работы деформации на плоскости сдвига; q_{mp} – тепловой поток от работы трения на площадке износа; τ_{mp} – время между резами зернами, следующими друг за другом след в след; τ_1 – время действия источника тепла от работы деформации; τ_2 – время действия источника тепла от работы трения на площадке износа; i – порядковый номер режущего зерна; n – число последовательно режущих зерен за время пребывания обрабатываемой поверхности в пределах пятна контакта с кругом.

Разработка конечно-разностной модели

Геометрический образ конечно-разностной модели очень простой. Это стержень, разбитый на элементы, которые определяются размером вдоль оси X и местом его на стержне, т.е. либо номером с отсчетом от начала стержня, либо координатой по оси X. Выбор размеров элементов и их количества производится на основе ряда зависимостей [5] и окончательно решается экспериментально в процессе обработки модели на ЭВМ.

В рассматриваемом в последующем примере стержень разбит на 75 элементов. В середине стержня на границе 37^{го} и 38^{го} элементов вводится тепловой поток. Элементы, прилегающие с двух сторон к вводимому тепловому потоку от 34 до 43 имеют размер вдоль оси X $h_1=0,00005$ см; с 22 по 30 и с 44 по 54 - $h_2=0,0002$ см; с 11 по 21 и с 55 по 65 - $h_3=0,002$ см; с 1^{го} по 10^{ый} и с 66 по 75 - $h_4=0,005$ см. Заменяя в (1) производные по координате X центральными конечными разностями получаем конечно-разностную модель:

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{a(T_i)}{h^2} (T_{i+1} - T_{i-1} - 2T_i) \pm \frac{V}{2h} (T_{i+1} - T_{i-1}). \quad (4)$$

Если обозначить $\frac{a(T_i)}{h^2} = k_i$, $\frac{V}{2h} = V_i$, то блок-схема моделирования уравнения (4) в пакете "VisSim" [4] будет такой, как показано на рис.2.

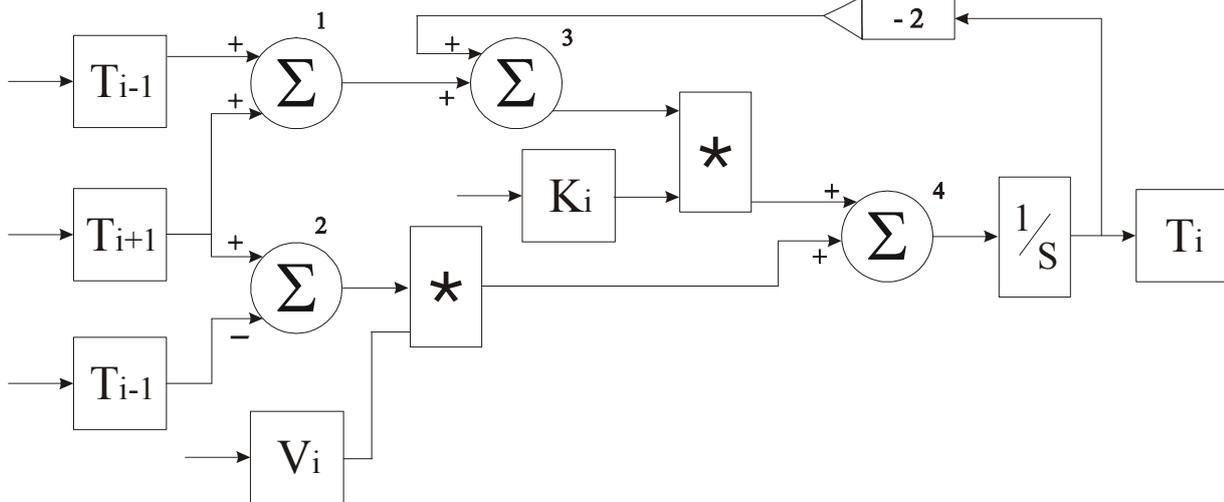


Рис. 2. Блок-схема моделирования уравнения (4).

В коэффициент K_i входит значение коэффициента температуропроводности $a(T_i)$ как функция температуры. Известно, что $a = \lambda / C_v$ см²/с, где λ – коэффициент теплопроводности $\frac{\text{Дж}}{\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}}$, C_v – объемная теплоемкость $\frac{\text{Дж}}{\text{см}^3 \cdot \text{град}}$. Зависимость $C_v(T)$ и $\lambda(T)$ для стали X18H10Г взяты из работы [3]:

$$\left. \begin{aligned} C_v(T) &= 3,856 + 0,000565 \cdot T \\ \lambda(T) &= 0,23 - 0,13e^{-0,002 \cdot T} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Вычисление $a(T) = \lambda(T) / C_v(T)$ с использованием зависимостей (5) в пакете "VisSim" неудобно в связи с громоздкостью и поэтому зависимость $a(\tau)$,

учитывая ее характер, аппроксимировали методом наименьших квадратов полиномом 2^{ой} степени:

$$a(T) = 0,024 + 4,213 \cdot 10^{-5} T - 2,098 \cdot T^{-8} \cdot T^2. \quad (6)$$

Погрешность аппроксимации в пределах (0–1400)^о С не превышает 5%.

Тепловой поток от работы деформации q_p на плоскости сдвига определяем, основываясь на ортогональной схеме резания [6], показанной на рис.3, где P_S – сила сдвига на плоскости сдвига, P_{NS} – нормальная сила на плоскости сдвига. Эти силы, согласно исследованиям Корчака С.Н. [3], определяются по следующим формулам:

$$P_S = \frac{a}{\sin \beta} \cdot \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}}; \quad (7)$$

$$P_{NS} = \frac{1,5 \cdot a}{\sin \beta} \cdot \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}}, \quad (8)$$

где β – угол сдвига; σ_i – интенсивность напряжений при скорости и степени деформации, соответствующих шлифованию.

Соответственно, мощность пластической деформации на плоскости сдвига:

$$N_S = P_S \cdot V_S \cdot \frac{a \cdot \sigma_i}{\sin \beta \cdot \sqrt{3}}, \quad (9)$$

где V_S – скорость сдвига.

Скорость сдвига V_S находится из диаграммы скоростей, также показанной на рис.3:

$$V_S = \frac{V \cdot \cos \gamma}{\cos(\gamma + \beta)}, \quad (10)$$

где V – скорость шлифования; γ – передний угол на зерне.

Следовательно, тепловой поток от работы деформации:

$$q_P = \frac{P_S \cdot V_S}{S_S} = \frac{\sigma_i \cdot \cos \gamma}{\sqrt{3} \cos(\gamma + \beta)} \cdot V, \quad (11)$$

где $S_S = \frac{a}{\sin \beta}$ – площадь плоскости сдвига при единичной ее ширине.

При $V=50$ м/с, $\gamma = -45^\circ$ и $\beta=22^\circ$ [3] получаем:

$$q_P = 52 \cdot \sigma_i \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}. \quad (12)$$

Тепловой поток от работы трения на задней поверхности вычисляется согласно формулы, предлагаемой Корчаком С.Н. [3]:

$$q_{mp} = 0,15 \cdot \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \cdot V, \quad (13)$$

$$\text{и при } V=50 \text{ м/с, } q_{тр}=4,33 \cdot \sigma_i. \quad (14)$$

Зная тепловые потоки, находим из известного закона:

$$q = -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial t}$$

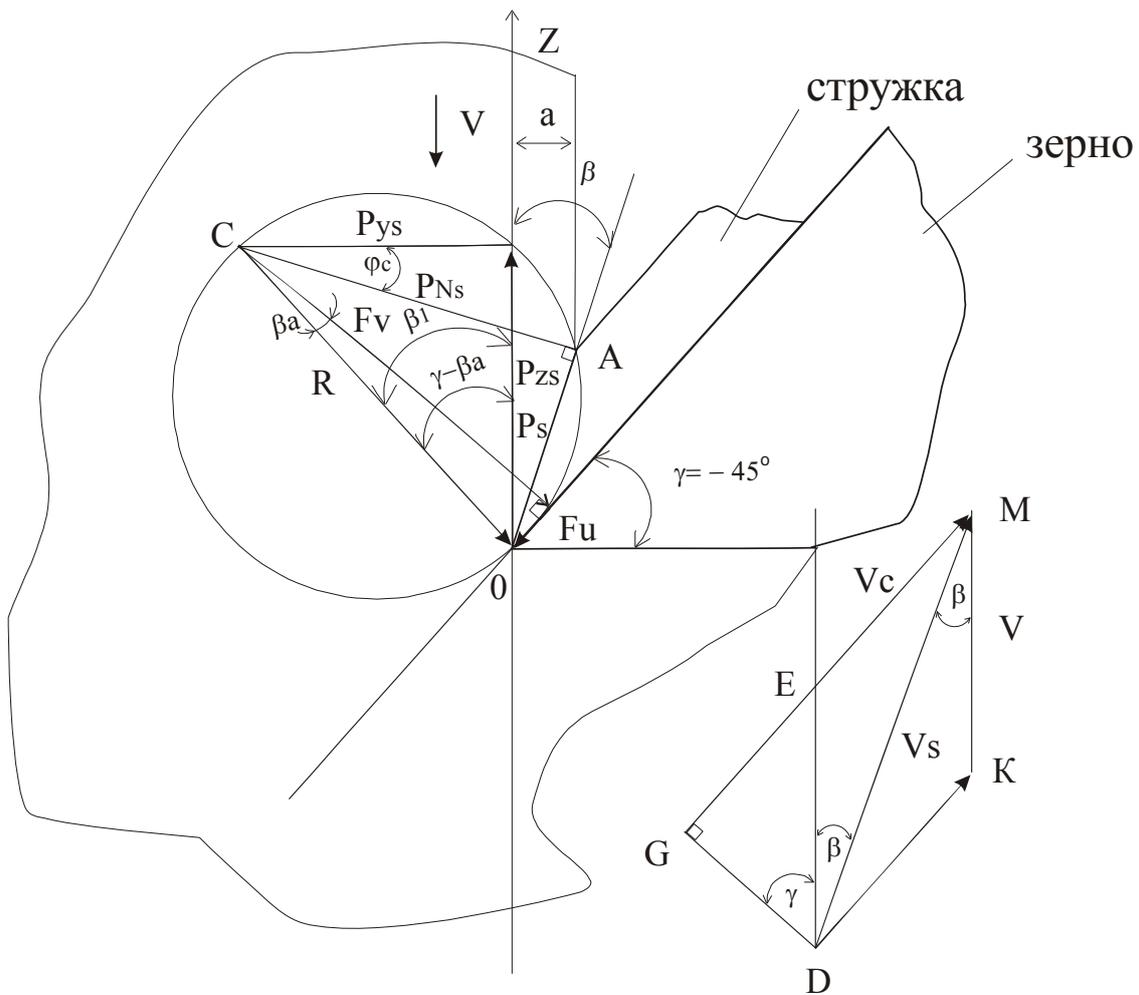


Рис. 3. Расчетная схема.

с заменой $\frac{\partial T}{\partial x}$ конечной разностью на границе $37^{\text{го}}$ и $38^{\text{го}}$ элементов стержня, температуру dT , которую добавляем к температуре $37^{\text{го}}$ элемента:

$$T_{38} = T_{37} + dT = T_{37} + \frac{q \cdot h l}{\lambda}. \quad (15)$$

Соответственно, для получения теплового потока от работы деформации:

$$dT_1 = \frac{q_p \cdot h l}{\lambda(T_{37})}, \quad (16)$$

и для потока от работы трения:

$$dT_2 = \frac{q_{mp} \cdot h l}{\lambda(T_{37})}. \quad (17)$$

Температура dT_1 добавляется к T_{37} в течение времени τ_1 – времени перемещения стержня вдоль плоскости сдвига, а τ_2 – в течение времени перемещения стержня через площадку износа.

Программирование периодического ступенчатого сигнала в пакете "Vis-Sim" описано в работе [7]. В нашем случае это последовательность двух ступенчатых сигналов продолжительностью τ_1 и τ_2 соответственно. Они могут быть не строго прямоугольными, т.к. $\lambda(T_{37})$ изменяется с изменением температуры T_{37} .

В формулы (13) и (14) входит σ_i , которая является функцией температуры.

В работе [3] приведены экспериментальные зависимости $\sigma_i(T)$ для стали X18H9T, учитывая ее график. Эта зависимость аппроксимирована кусочно тремя формулами, каждая из которых используется в соответствующем диапазоне температур:

в диапазоне $T=(0\div 600)^\circ\text{C}$

$$\sigma_i = 2,175 \cdot 10^5 - 187,5 \cdot T + 0,437 \cdot T^2, \quad (18)$$

в диапазоне $T=(600\div 1200)^\circ\text{C}$

$$\sigma_i = 6,005 \cdot 10^{-5} - 737,5 \cdot T + 0,313 \cdot T^2, \quad (19)$$

а в диапазоне $T > 1200^\circ\text{C}$

$$\sigma_i = 1,442 \cdot 10^9 \cdot e^{-0,0077 \cdot T}. \quad (19)$$

Уравнение экспериментальной зависимости $\sigma_i(T)$ с ее аппроксимацией $\sigma_1(T)$ показаны на графиках рис. 4, из которых видна удовлетворительная точность аппроксимации.

В работе рассматривается модель применительно к круглому наружному шлифованию на станке 3М163 с кругом диаметром 750 мм со скоростью шлифования $V=50$ м/с заготовки диаметром 100 мм со скоростью ее вращения 0,833 м/с и глубиной шлифования $h=0,02$ мм. Принимаем, что толщина среза a_z единичным зерном является следствием выбранной зернистости и состоянием его режущей поверхности.

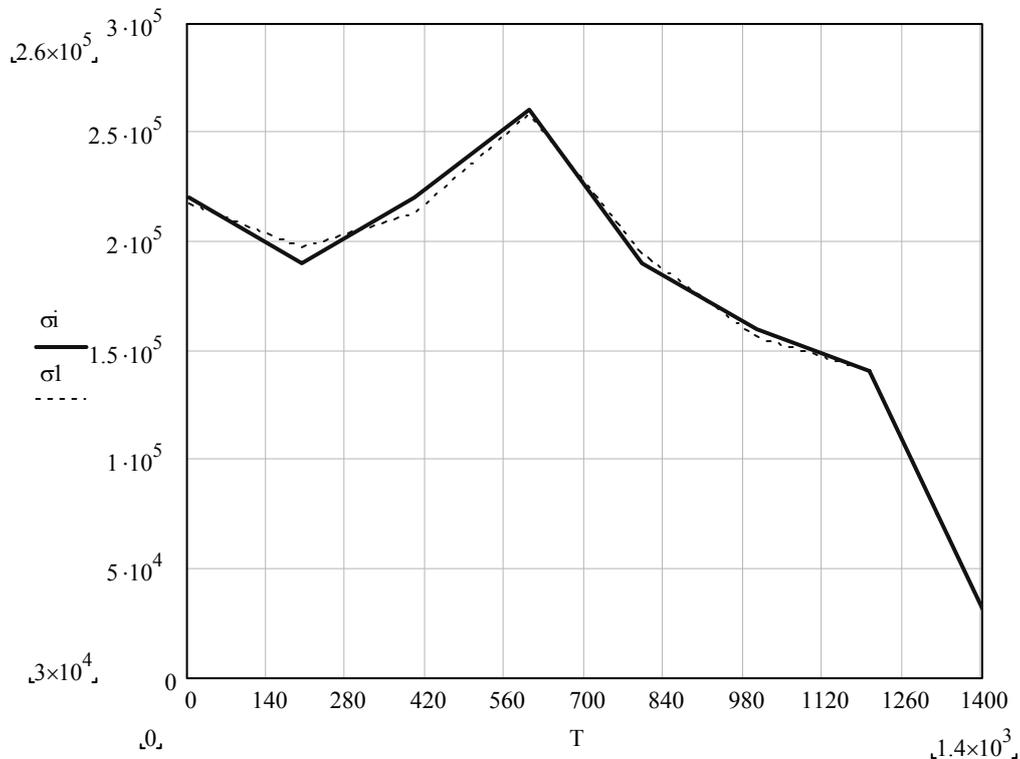


Рис. 4.

Как пример, выбираем $a_z=2$ мкм, а величина площадки износа $l_3=0,1$ мм. В работе [2] получены формулы расчета t_p — времени между резами, числом резов n до выхода поверхности заготовки из зоны контакта с кругом, расстояния L

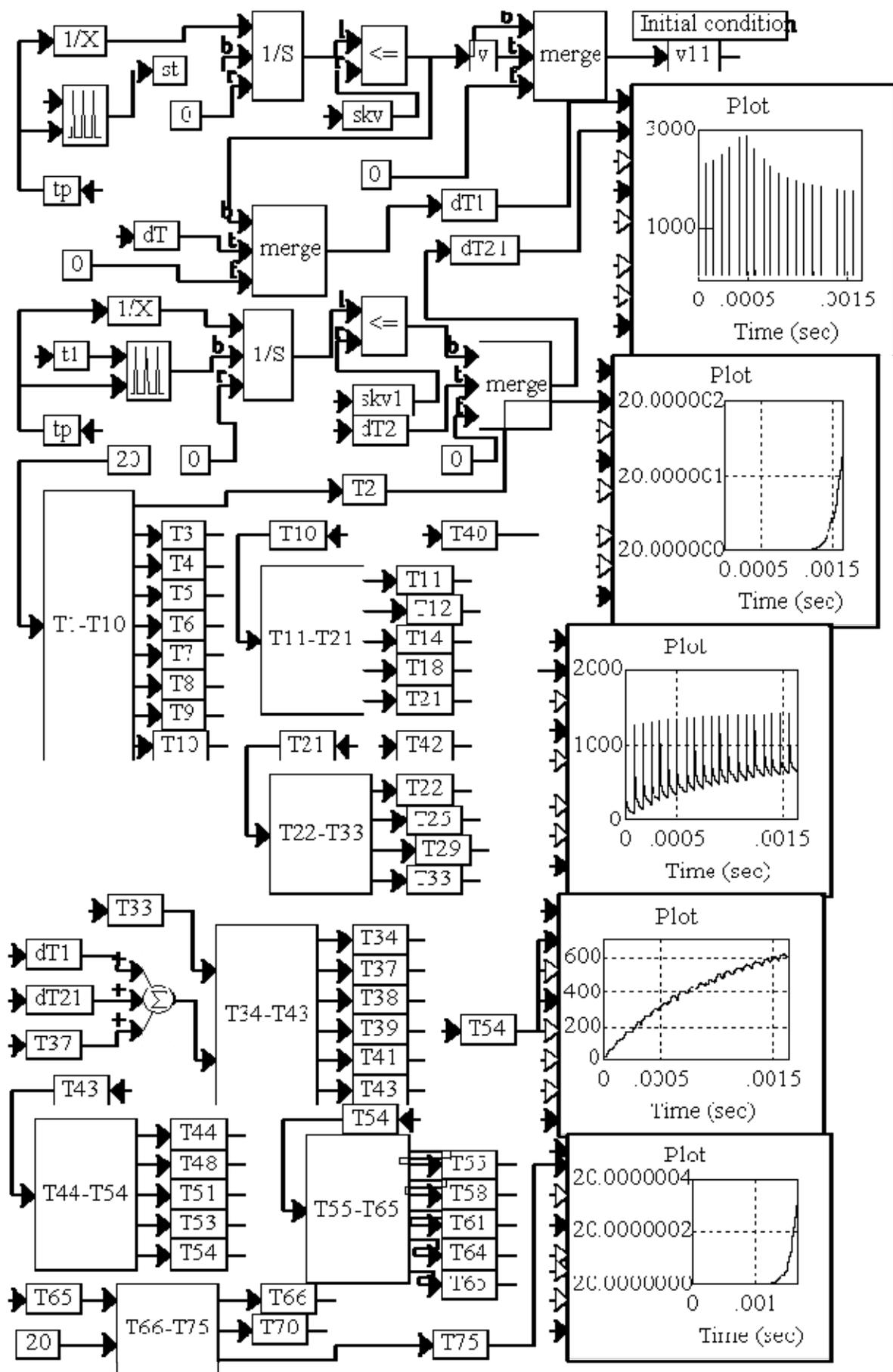


Рис. 5. Первая страница файла модели.

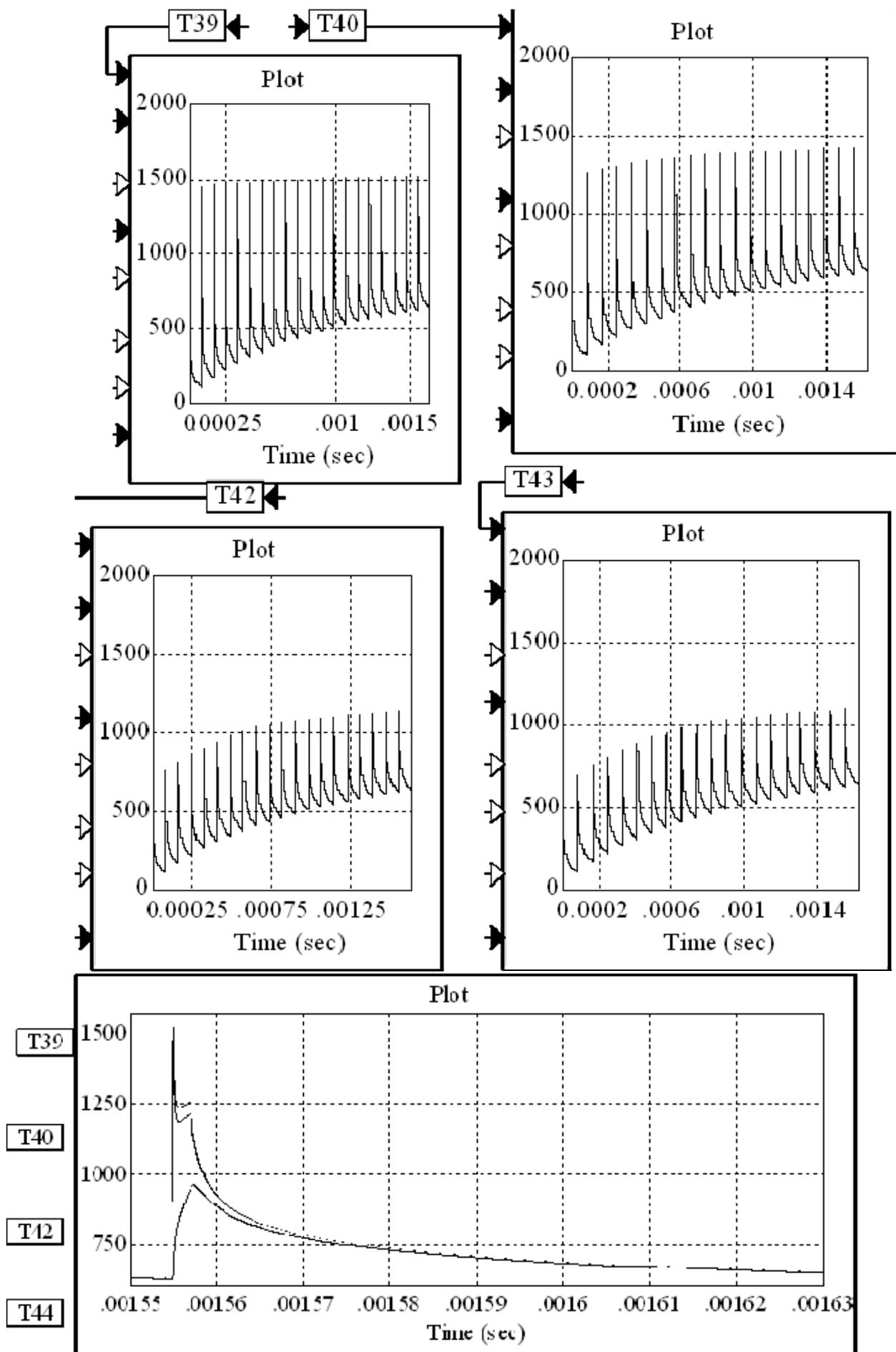


Рис. 6. Изменение температуры при последнем резе на различных глубинах.

между режущими зёрнами применительно для плоского шлифования. Заменяв в них радиус R на эквивалентный радиус Re [8] применительно для круглого наружного шлифования, получены необходимые параметры t_p , n , L_p , для вышеуказанных условий шлифования $t_p=8.184 \cdot 10^{-5}$ с, $n=19,483$, $L_p=4,092$ мм.

Время прохождения заготовки через зону пластической деформации τ_1 и время τ_2 получим из: $\tau_1 = \frac{a_z}{\text{tg}\beta \cdot V} = 9.9 \cdot 10^{-8}$ с; $\tau_2 = \frac{l_3}{V} = 2 \cdot 10^{-6}$ с.

На рис.5 приведена первая страница файла модели, на которой выведены графики dT_1 , dT_2 , T_2 , T_{40} , T_{54} и T_{75} . Из графиков T_2 и T_{75} видно, что граничные условия (2) соблюдаются. График T_{40} показывает, как последовательно от раза к разу колеблется температура на расстоянии 1 мкм от поверхности заготовки, а график T_{54} – на расстоянии 24,5 мкм.

Пакет "VisSim" открывает богатые возможности для исследования. Можно в увеличенном масштабе видеть изменение температуры за время последнего реза, т.е. увидеть кинетику изменений температуры поверхности заготовки при выходе из зоны контакта, причем на различной глубине. На рис.6 показан график изменения температуры при последнем резе на различных глубинах T_{39} (0.5 мкм), T_{40} (1 мкм), T_{42} (2 мкм), T_{43} (2.5 мкм). Можно также выявить степень и характер влияния a_z и l_3 , вид материала, влияние учета охлаждения зёрен до начала их резания и др. Результаты этих исследований будут предметом дальнейшего анализа и публикаций.

Литература: 1. Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Пирогов А.Ю. Теплофизика резания единичным абразивным зёрном. "Восточно-европейский журнал передовых технологий", №1/5 (31), 2008. – С. 30-40. 2. Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Ушаков А.Н. Температура самоподогрева при шлифовании. – "Восточно-европейский журнал передовых технологий", № 1/5 (37), 2009. – С 24-37. 3. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с. 4. Дьяконов В.П. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное моделирование. – М.: Солон-Пресс, 2004. – 384 с. 5. Остафьев В.А. Расчет динамической прочности инструмента. – М.: Машиностроение, 1979. – 166 с. 6. Jusuf Altintas. Manufacturing Automation. Metal cutting mechanics, machine tool vibration, and CNC design. Cambridge University Press. 200. 7. Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Чайка Э.Г., Пирогов А.Ю. Температурное поле системы зерно-связка абразивного круга. "Восточно-европейский журнал передовых технологий", № 2/2 (20), 2006. – С. 72-78. 8. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1981. – 141 с.

УДК 621.91

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ СОЖ

Ларшин В.П., докт. техн. наук, **Макаров С.Н.**, канд. техн. наук
(г. Одесса, Украина)

An analysis of metal-working lubricant (MWL) influence on the tool life is given and a taking into account the MWL factor technique while selecting cutting conditions is carried out.

1. Учёт влияния СОЖ на режимы и силы резания (состояние вопроса). При использовании расчётно-аналитического метода определения режимов резания (РР) [1] используется метод поправочных коэффициентов, в соответствии

с которым в известную формулу Ф. Тейлора для скорости резания (в качестве факторов в эту эмпирическую формулу входят элементы режима резания: t , s и V) вводят произведение поправочных коэффициентов, учитывающих, например, такие дополнительные факторы как: обрабатываемый материал (коэффициент K_{i_v}); состояние поверхности заготовки (коэффициент K_{i_v}); инструментальный материал (коэффициент K_{e_v}). Фактор СОЖ также можно отнести к дополнительным, однако таким, который меньше отражён. Учёт СОЖ производится одним из трёх способов [1]:

1) Отдельной строкой табличных данных. Например, в табл. 28 [1] (для сверления) указывают два случая охлаждения: «есть» или «нет». А в табл. 39 [1] (для фрезерования) около вида инструментального материала ставят сноску о том, есть или нет охлаждение.

2) В примечании к соответствующим таблицам указывают, что без охлаждения необходимо вводить поправочный коэффициент на скорость резания. Например, в таблицах 17 и 20 [1] (для точения) указаны, соответственно, такие коэффициенты: 0,8 и 0,9 [1].

3) В примечании к табл. 49 [1] указывают, что резьбонарезание осуществляют с применением СОЖ, которые рекомендованы для данного вида обработки.

2. Разработка математической модели процесса резания. Приведенный анализ работы [1] показывает, что наличие более эффективной СОЖ (по аналогии с п.2) можно учесть, во-первых, поправочным коэффициентом в формуле Ф. Тейлора и, во-вторых, этот коэффициент должен быть больше единицы. Таким образом, например, применительно к методу продольного точения получим

$$V_T = \frac{C_v \cdot K_{\tilde{m}e}}{T^m \cdot t^x \cdot s^y} \cdot K_v, \quad (1)$$

где V_T – скорость резания, обеспечивающая требуемую стойкость (T) режущего инструмента, м/мин; $K_{\tilde{m}e}$ – коэффициент технологической эффективности СОЖ, учитывающий её влияние на РР, $K_{\tilde{m}e} \geq 1$.

Коэффициент $K_{\tilde{m}e}$ можно определить из сравнения кривых износа для базовой (традиционной СОЖ) и разработанной (новой).

Из формулы (1) следует, что увеличение эффективности СОЖ (характеризуется возрастанием коэффициента $K_{\tilde{m}e}$) приводит к увеличению скорости резания при той же величине размерной стойкости инструмента (T). Например, применительно к частному случаю [2, с.14] получим

$$V_T = \frac{371 \cdot K_{\tilde{m}e}}{T^{0,2} \cdot t^{0,15} \cdot s^{0,35}} \cdot K_v \quad (2)$$

Составляющие силы резания при точении находят по формуле [1, с.271]:

$$P_{z,y,x} = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s^y \cdot V^n \cdot K_p, \quad (3)$$

где постоянная величина C_p и показатели степени x , y и n для каждой из составляющих силы резания приведены в табличных данных [1, с.273-274,

табл. 22]. В формуле (3) показатель степени $n \leq 0$, например, $n = -0,15$, $n = -0,3$ и $n = -0,4$ для составляющих сил резания P_z , P_y и P_x , соответственно, при наружном продольном точении и растачивании [1, с. 273, табл.22]. Следовательно, с увеличением скорости резания (при прочих равных условиях) составляющие силы резания уменьшаются.

При использовании более эффективной СОЖ скорость резания можно увеличить (при той же стойкости РИ). Следовательно, использование указанной СОЖ будет связано с уменьшением сил резания при точении и растачивании. Это, в свою очередь, приведёт к уменьшению упругих перемещений в технологической системе (ТС) при фиксированной её жёсткости.

4. Методика экспериментального определения коэффициента $K_{\text{иэ}}$. Известно, что при эксплуатации немерных инструментов, например, на станках-автоматах и автоматических линиях время непрерывной работы инструмента до снятия его на переточку зависит от размерной стойкости инструмента – времени его работы, на протяжении которого инструмент обеспечивает обработку деталей в интервале допуска на размер (по чертежу детали или карте эскизов).

Для оценки влияния полимерной добавки в СОТС интенсивность размерного износа инструмента U_L (мкм/км) определяли по износу режущей кромки в направлении нормали к обработанной поверхности для двух случаев: СОТС с полимером и без него на одном и том же участке пути резания L (рисунок). Причём

$$U_L = \frac{dU}{dL} = \frac{U_e - U_i}{L_e - L_i}, \quad (4)$$

где U_e, U_i – текущая (конец интервала) и начальная (начало интервала) величины износа, мкм; L_e, L_i – конечная и начальная координаты пути резания, км.

Размерный износ резцов Т30К4 определяли на интервале времени их работы, в пределах которого шероховатость обрабатываемой поверхности не превышала $R_z = 100$ мкм. Режимы резания при обработке образцов из конструкционной стали (HRC 28...30): $V = 120$ м/мин, $s = 0,06$ мм/об. Как видно из рисунка добавка полимера к СОТС существенно уменьшает износ инструмента. То есть при использовании СОТС с полимером время за которое инструмент будет обеспечивать обработку деталей в заданном поле допуска на данную операцию (например, в соответствии с операционным эскизом) существенно увеличивается.

В свою очередь, при увеличении размерной стойкости инструмента уменьшается его износ на рассматриваемом промежутке времени работы. Это приводит к увеличению стабильности операции по точности размеров, формы и взаимного расположения поверхностей, например, уменьшается конусность деталей, обеспечивается перпендикулярность боковой поверхности цапф к оси деталей и т.п.

По формуле (4) при $U_i = 0$ и $L_i = 0$ определим коэффициент K (мкм/км) интенсивности износа инструмента для начального участка графиков (рисунок)

$$K = \frac{U}{L}. \quad (5)$$

Получим для кривых 1 и 2 на рисунке

$$K_1 = \frac{U_1}{L_1} = \frac{2,5}{3,5} = 0,71 ; \quad K_2 = \frac{U_2}{L_2} = \frac{4,8}{3,5} = 1,37.$$

Видно, что коэффициент интенсивности износа в первом случае (с добавкой полимера в СОТС) почти в два раза меньше, чем во втором случае (без добавки полимера). Ещё более эффективные результаты были получены при сверлении: $K_1 = 0,42$ и $K_2 = 3$. Это связано с тем, что при прочих равных условиях процесс резания при сверлении отличается большей теплонпряжённостью. Как следствие, увеличивается трибологическая активность продуктов пиролитического распада полимерной компоненты, содержащейся в СОТС. Это (через совокупность множества механико-физико-химических микропроцессов в зоне резания) в конечном счёте, позитивно влияет на увеличение стойкости режущего инструмента. На наш взгляд указанные микропроцессы отражаются на вибрации инструмента и на жёсткости технологической системы. Этот вопрос подлежит дальнейшему изучению.

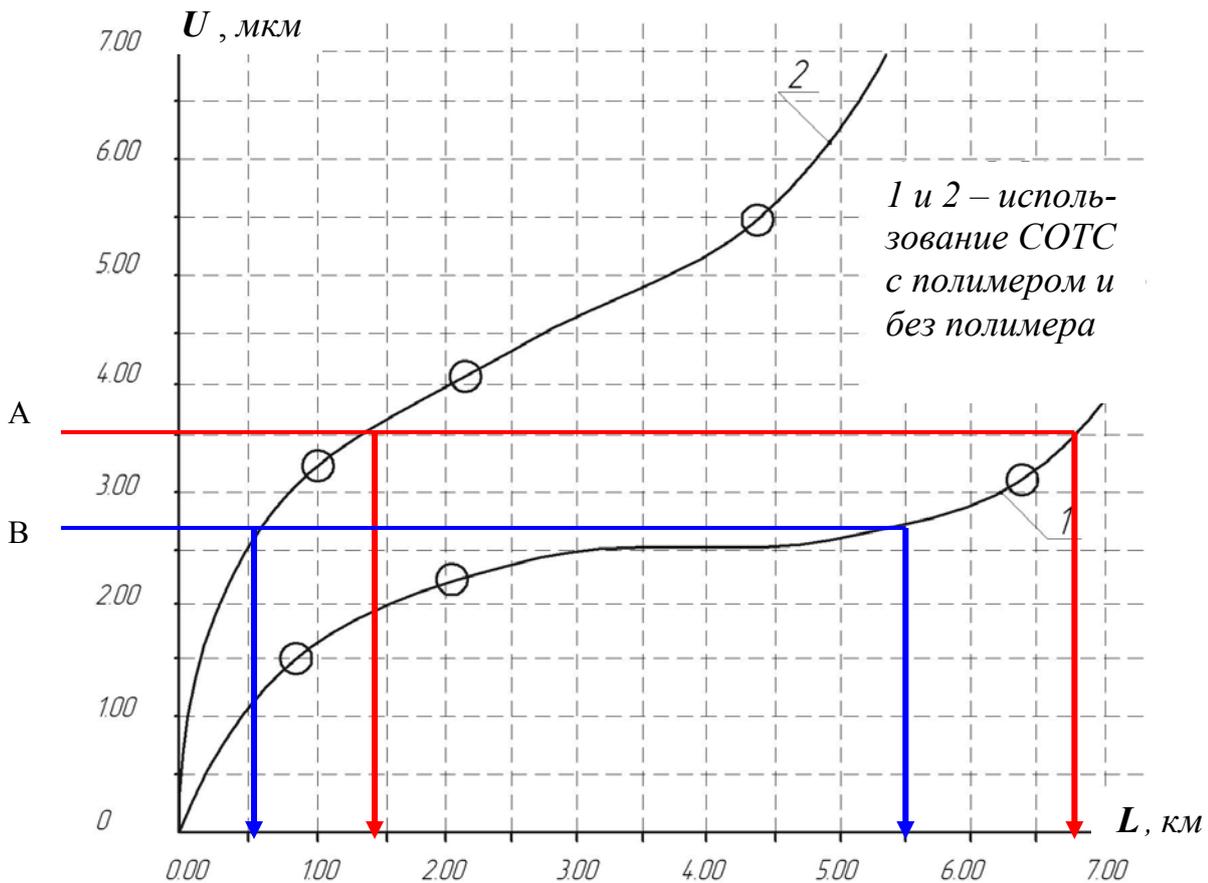


Рис. 1. Зависимость износа U инструмента при точении от длины пути резания L .

Коэффициент технологической эффективности $K_{\text{тэ}}$ найдём исходя из следующих соображений.

Из формулы (1) определим величину стойкости T . Получаем

$$T = \frac{(C_v \cdot K_{\tilde{m}\epsilon} \cdot K_v)^{1/m}}{v^{1/m} \cdot s^{y/m} \cdot t^{x/m}} \quad (6)$$

Если стойкости РИ при использовании новой ($K_{\tilde{m}\epsilon} > 1$) и базовой ($K_{\tilde{m}\epsilon} = 1$) СОЖ обозначить, соответственно, как T_i и T_a , то их отношение составит

$$\frac{T_i}{T_a} = K_{\tilde{m}\epsilon}^{1/m} \quad (7)$$

Тогда

$$\left(\frac{T_i}{T_a}\right)^m = K_{\tilde{m}\epsilon} \quad (8)$$

Формулу (8) можно записать в виде

$$K_{\tilde{m}\epsilon} = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{T_i}{T_a}} \quad (9)$$

Как следует из анализа рисунка, двум критериям стойкости $A = 3,60$ мкм и $B = 2,80$ мкм соответствуют интервалы длины обработки (путь, проходимый резцом до потери стойкости инструмента) 150–680 м и 60–560 м, соответственно. Таким образом, увеличение стойкости инструмента (T_i / T_a) с применением более эффективной СОЖ составляет, соответственно 680 : 150 = 4,5 и 560 : 60 = 9,3. Найдём коэффициент технологической эффективности СОЖ по формуле (9). Получаем, что при увеличении стойкости РИ в 4,5...9,3 раза интервал изменения коэффициента $K_{\tilde{m}\epsilon}$ составляет 1,40...1,55, т.е. $1,40 \leq K_{\tilde{m}\epsilon} \leq 1,55$.

Выводы.

1. Введен коэффициент технологической эффективности СОЖ ($K_{\tilde{m}\epsilon}$), показывающий во сколько раз может быть увеличена скорость резания, если при прочих равных условиях стойкость инструмента (за счёт применения более эффективной СОЖ) возрастёт в $\frac{T_i}{T_a} = K_{\tilde{m}\epsilon}^{1/m}$ раз.
2. Существенное возрастание стойкости инструмента (например, в 4,5...9,3 раза) приводит к гораздо меньшему (в 1,40...1,55 раза) возрастанию скорости резания.
3. Выполненный анализ математической модели процесса резания применим для оценки эффективности разных видов СОТС, в том числе для твёрдых технологических смазок, которые находят применение при лезвийной и абразивной обработке.

Литература: 1. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 496 с. 2. Фельдштейн Э.И. Методика назначения наивыгоднейших режимов резания. – Минск: Высшая школа, 1963. – 74 с. 3. Армарего И.Дж.А., Браун Р.Х. Обработка металлов резанием. – Пер. с англ. В.А. Пастунова. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.

КОМПЬЮТЕРНАЯ ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПРИ ПОИСКЕ ЭФФЕКТИВНЫХ СОТС

Ларшин В.П., докт. техн. наук, **Лищенко Н.В.**, канд. техн. наук,
Рыбалко А.П., канд. техн. наук, **Трифопова Е.А.**
(г. Одесса, Украина)

A large number of experimental data computer processing methodologies on the example of finding effective metal-working lubricants are described.

Актуальным направлением в современной технологии машиностроения является применение компьютерных автоматизированных систем научных исследований, основанных на автоматизации сбора измерительных данных и их автоматической обработке [1]. Это вызвано необходимостью обработки большого количества экспериментальных данных (в рассматриваемом случае порядка 26×10^6 измерений). Для создания таких систем нужны соответствующие компьютерные технологии обработки данных и инструментальные компьютерные средства для их реализации. Ниже даётся описание разработанной методологии компьютерной обработки экспериментальных данных, позволяющей автоматизировать технологические исследования, связанные с обработкой большого количества (порядка 10^8) первичных многоканальных измерений.

В ходе экспериментов определяли полезный крутящий момент на шпинделе (сверле) и полезную осевую силу резания с частотой измерения 200 Гц. Причем для каждого из указанных параметров полезный сигнал ($S_{\dot{I}}$) определяли по формуле

$$S_{\dot{I}} = S_{\Sigma} - S_{\dot{\omega}\dot{\omega}}, \quad (1)$$

где S_{Σ} , $S_{\dot{\omega}\dot{\omega}}$ – сигналы, характеризующие суммарную величину параметра и уровень его холостого хода, соответственно.

В качестве сигналов, характеризующих крутящий момент (M_{Σ}) и осевую силу (D_{Σ}) резания, использовали квадратурные токи соответствующих приводов станка: привод главного движения и привод вертикальной подачи. Эти квадратурные токи используются в указанных приводах для прецизионного автоматического регулирования частоты вращения соответствующих асинхронных электродвигателей. В системе ЧПУ «Flex NC» (ООО «Станкоцентр», г. Москва) эти сигналы сделаны доступными для измерения с целью контроля и диагностики технологической системы механической обработки. При работе станка автоматически формируются файлы, содержащие измерительную информацию в формате *ppl* (рис.1).

Для того, чтобы обработать большое количество экспериментальных данных удобно применить пакет MATLAB – среду и язык программирования для компьютерной обработки данных. Это вызвано тем, что возможности стандартного файла приложения Excel ограничены числом измерений (число строк таблицы Excel), не превышающим 65536 и возможностью построения графика по результатам первых 32000 измерений.

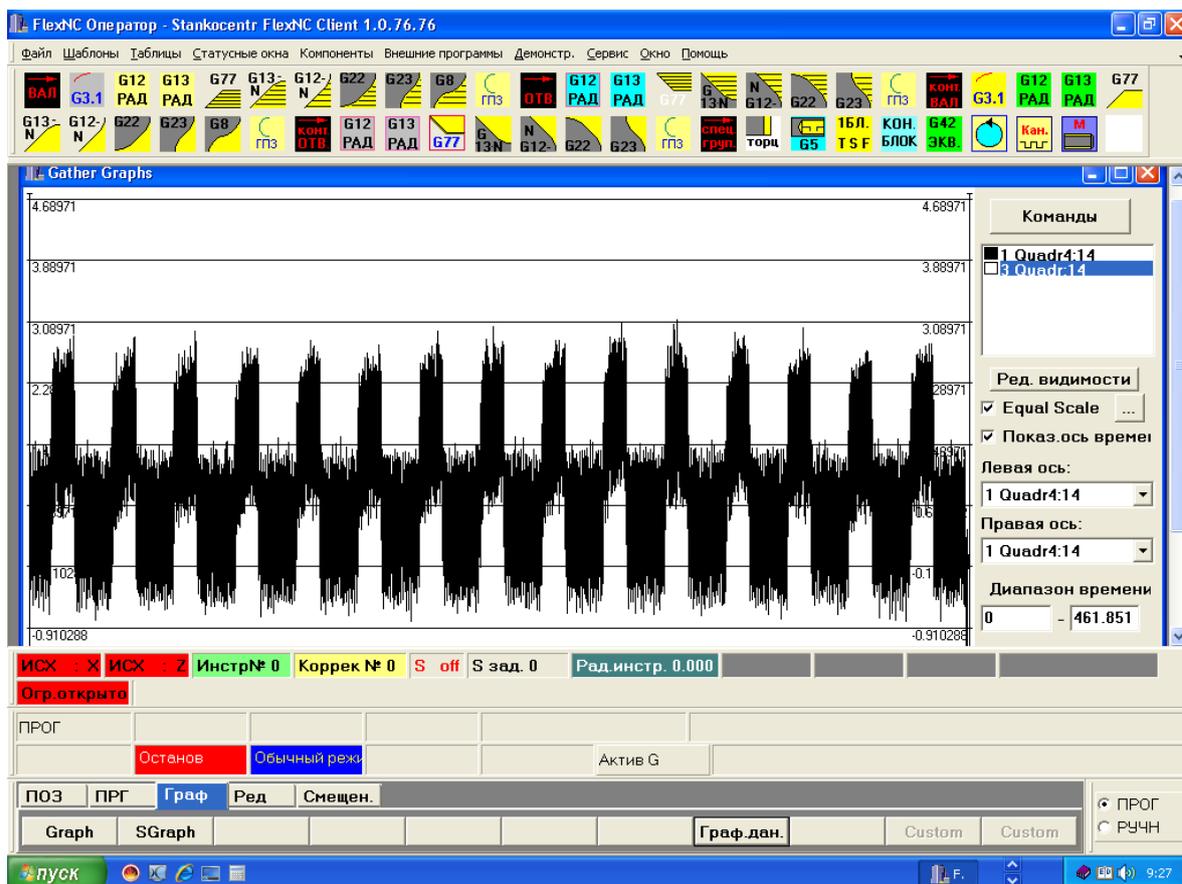


Рис.1. Первичная измерительная информация о крутящем моменте на шпинделе станка в среде «Flex NC».

Разработанная методика компьютерной обработки данных выполняется по следующему плану.

1. В приложении Excel открыть первичный файл измерительных данных (с расширением *ppl*), в котором удалить служебную информацию (содержалась в файле *ppl*).
2. Выбрать метод фильтрации (сглаживания) первичного высокочастотного сигнала, например, «скользящее усреднение», позволяющее выделить тренд этого сигнала.
3. Так как исходные файлы данных (*ppl*) в системе «Flex NC» ограничены количеством точек измерений (порядка 60×10^3), объединить эти файлы в единый файл с помощью менеджера файлов (использован FAR manager).
4. В среде MATLAB создать первый *m*-файл (программа на языке MATLAB), в котором реализован выбранный алгоритм обработки данных («скользящее усреднение»). Для обработки полученного единого файла запустить программу MATLAB, в рабочем окне которой необходимо ввести название *m*-файла и единого файла (*ppl*). Окончательный файл (читается в приложении Excel) имеет два столбца новых данных, соответствующих двум информационным сигналам: суммарному крутящему моменту на шпинделе и суммарной осевой силе резания.
5. В среде MATLAB создают второй *m*-файл, который позволяет из информации, имеющейся в файле, полученном в пункте 4, выделить тренд изме-

нения полезного крутящего момента на шпинделе и полезной осевой силы резания по мере работы сверла в соответствии с формулой (1). Таким образом, можно проследить изменение этих сигналов в пределах времени обработки определенного количества отверстий, например, 30-ти отверстий.

В соответствии с первым пунктом плана файлы *ppl* для последующей обработки в среде MATLAB необходимо предварительно подготовить. Для этого их открывают в приложении Excel, удаляют из них служебную информацию (например, удаляют содержимое столбцов E, F, G на рис.2). Подготовленный файл представляет собой два столбца данных для суммарного крутящего момента и суммарной осевой силы резания, соответственно.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	STTFEED	1 Quadr4	3 Quadr					
2	=	=			_DESCRIF	string		
3		0	-0,44105		=			
4		-0,08639	-0,39722		_GGP_Col	string		
5		0	-0,43261		=		clBlack	
6		0,00884	-0,40761		_GGP_Col	string		
7		0,008448	-0,42819		=		clRed	
8		0,007864	-0,36316		_INTERVA	int		
9		0,00816	-0,43143		=		20	
10		0	-0,41995		1 Quadr4	double		
11		0	-0,38768		3 Quadr	double		
12		0,007376	-0,41666					
13		0,008256	-0,38843					
14		0	-0,39598					
15		0,040328	-0,3847					

Рис. 2. Первичный файл *ppl*, открытый в приложении Excel.

В соответствии со вторым пунктом плана применяют алгоритм «скользящего усреднения» для выделения тренда сигналов. Записанный в процессе сверления файл *ppl* имеет как низкочастотную, так и высокочастотную составляющую. Поэтому, при анализе данных производят их фильтрацию, устраняя высокочастотную составляющую. Для реализации алгоритма произведен расчет, например, по 100 предыдущим и 100 последующим значениям сигналов. При этом, количество точек, соответствующее сверлению, например 30-ти отверстий, сокращается в 100 раз (от 100 000 до 1000 точек).

Тренд сигнала формировали с использованием формулы

$$y_p = \frac{\sum_{i=(100(p-1))+1}^{100p+100} B_i}{200}, \quad (2)$$

где B_i – текущая величина сигнала; p – порядковый номер усредненных значений сигнала; y_p – значение p -ого усредненного значения сигнала.

В соответствии с третьим пунктом плана подготовленные файлы объеди-

няются по ходу эксперимента, так как файлы *ppl* с первичными данными, записанными в процессе сверления, ограничены по количеству точек измерений. Например, на рис.1 и рис.2 показаны данные для первого из двух файлов. Они получены при сверлении первых 15 отверстий (файл *14.ppl*). Данные для второй серии 15 отверстий (на рис.1 не показаны) записаны в файле *15.ppl*. После объединения этих файлов получают единый файл, например, *14-15.ppl* (на рис.1 и рис.2 не показан).

В соответствии с четвертым пунктом плана подготовленные единые файлы обрабатывают в среде MATLAB (окно 1 на рис.3) для получения результатов «скользящего усреднения». Например, если обработка на станке проводилась с семью различными составами ТТС, то единых файлов для последующей обработки в среде MATLAB будет семь. В результате расчета по «скользящему усреднению» (т.е. по выбранному алгоритму сглаживания) формируется окончательный файл и выводятся графики, соответствующие двум сигналам: суммарному крутящему моменту (окно 2 на рис.3) и суммарной осевой силе резания (окно 3 на рис.3). Окончательный файл, полученный после анализа в среде MATLAB, имеет расширение *dat*.

В соответствии с пятым пунктом плана создается второй *m*-файл (программа в среде MATLAB), для которого исходной информацией является окончательный файл, полученный в пункте 4. Программа (*m*-файл) применительно к крутящему моменту работает в соответствии с комментариями, показанными на рис.4. Точно так же эта программа работает для осевой силы резания (построение модели, выделение тренда сигнала и т.п.).

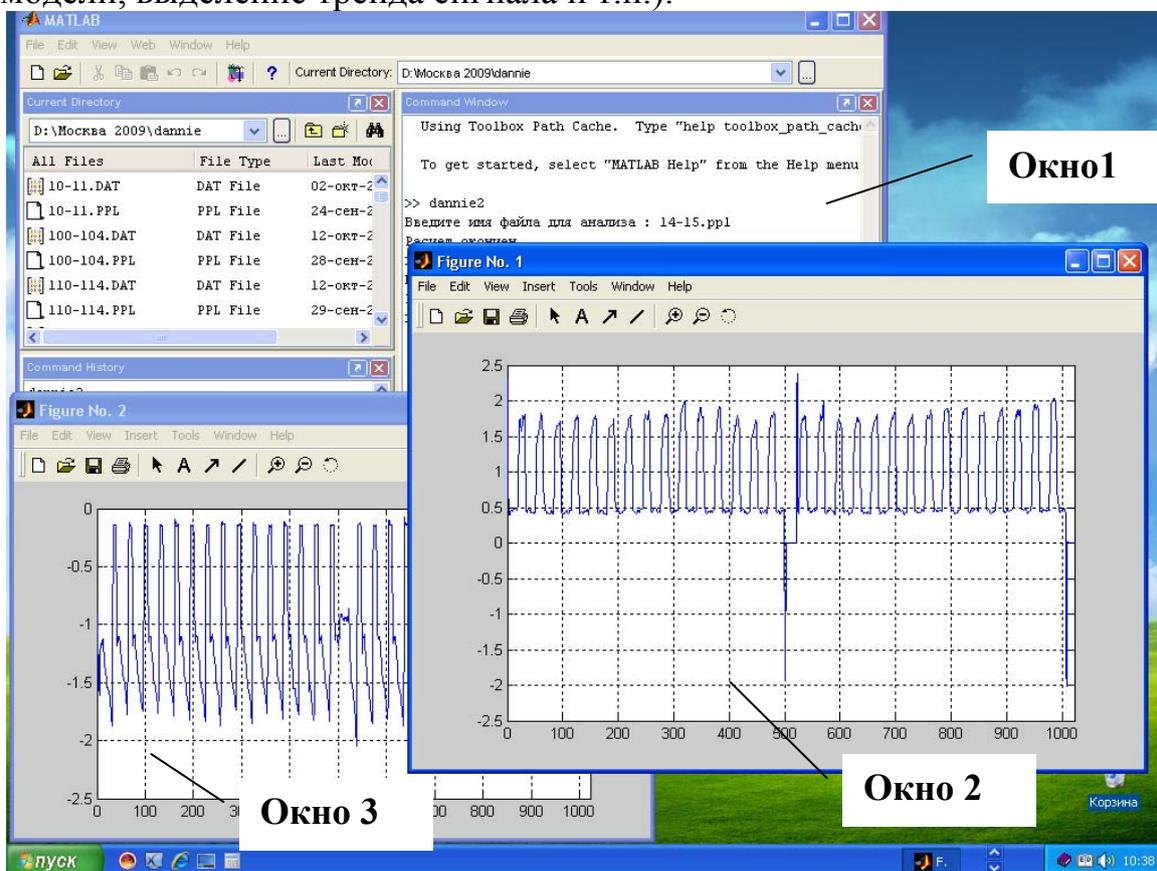


Рис.3. Результаты «скользящего усреднения» двух сигналов в среде MATLAB.

Построение и преобразование математической модели измеряемых сигналов в соответствии с алгоритмом на рис.4 можно пояснить схемой на рис.5.

Первичный сигнал (рис.5,а) преобразуют, применяя к нему метод «скользящее усреднение», в соответствии с формулой (2). Это позволяет сократить объем измерительной информации, путем ее усреднения, сохраняя при этом вклад всех первичных данных в математическую модель сигнала (вторичные данные), показанного на рис.5,б.

В соответствии с алгоритмом вводят численные значения верхнего и нижнего порогов сигнала (ВП и НП на рис.5,в), которые характеризуют два состояния технологической системы: резание и холостой ход. Если текущий уровень сигнала превышает ВП, то его на этом участке (участке превышения) усредняют по алгоритму «среднее арифметическое». Если текущий уровень сигнала ниже, чем НП, то его так же усредняют по указанному алгоритму на соответствующем участке (участке понижения). В результате формируется очередная математическая модель суммарного сигнала (рис.5,г).

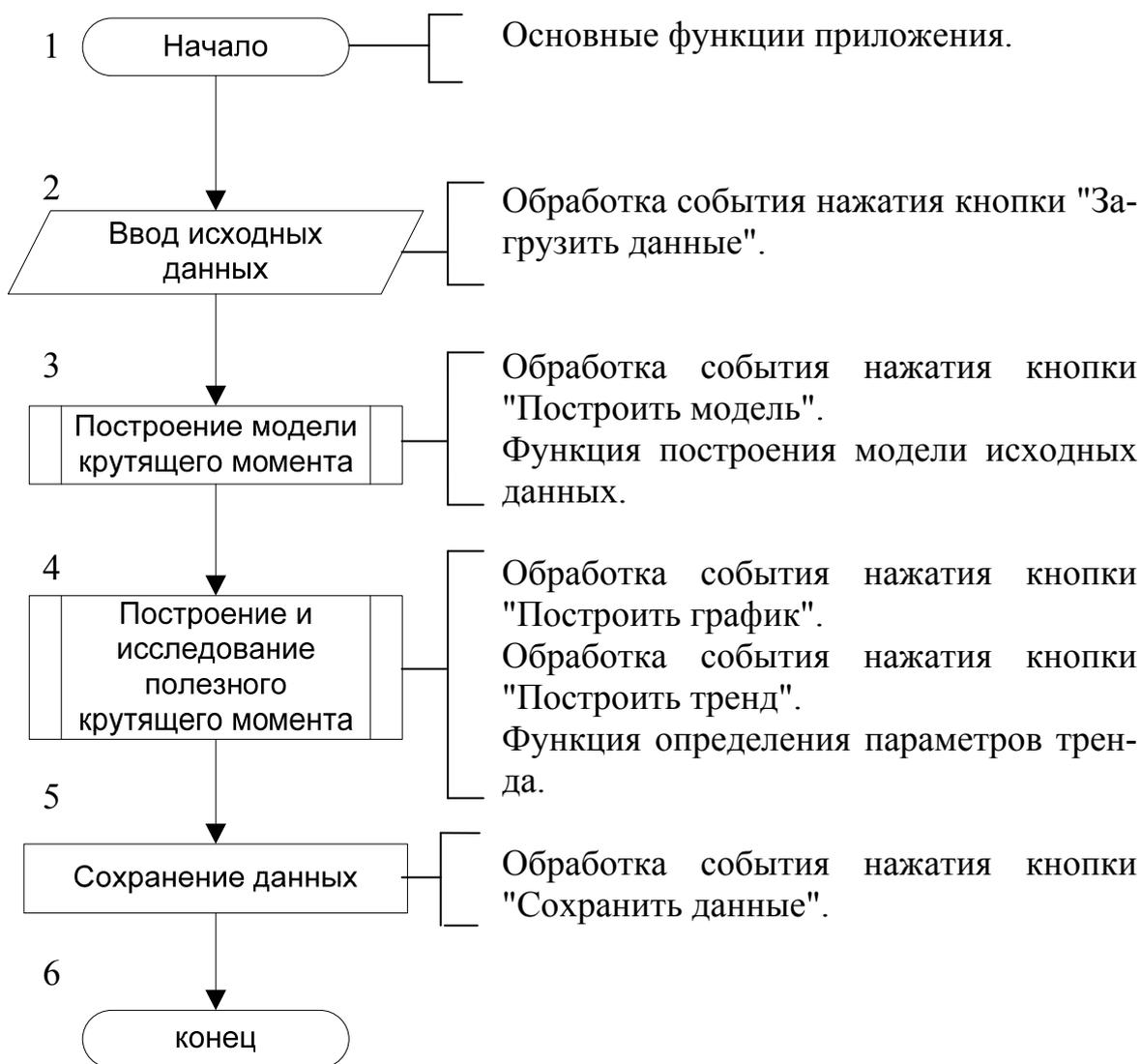


Рис.4. Блок-схема программы построения модели и исследования измеряемых параметров процесса сверления.

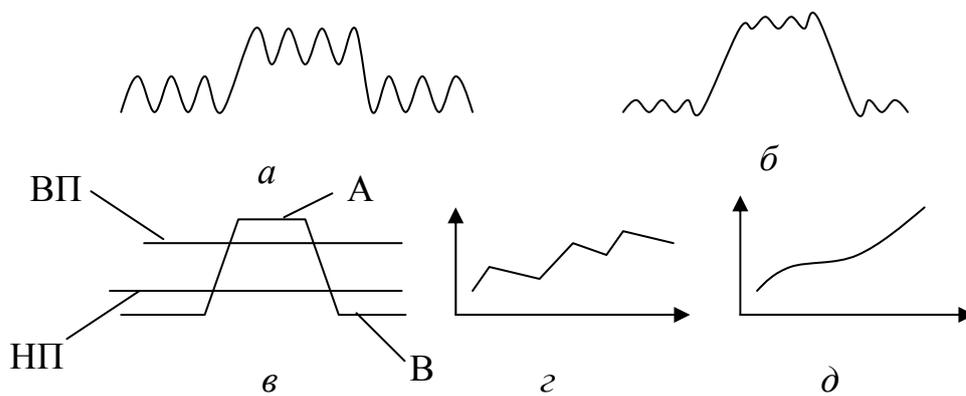


Рис.5. Схема преобразования математической модели измеряемых сигналов: ВП, НП – верхний и нижний пороги сигнала; А, В – усредненные значения сигнала при резании и холостом ходе; а, б, в, г, д – формы сигналов на разных этапах его преобразования.

На рис.6 в качестве примера подробно раскрыт блок 3, показанный на рис.4. Это – блок-схема функции построения модели исходных данных (рис.5,в). Надписи на рис.6 являются фрагментами программы MATLAB.

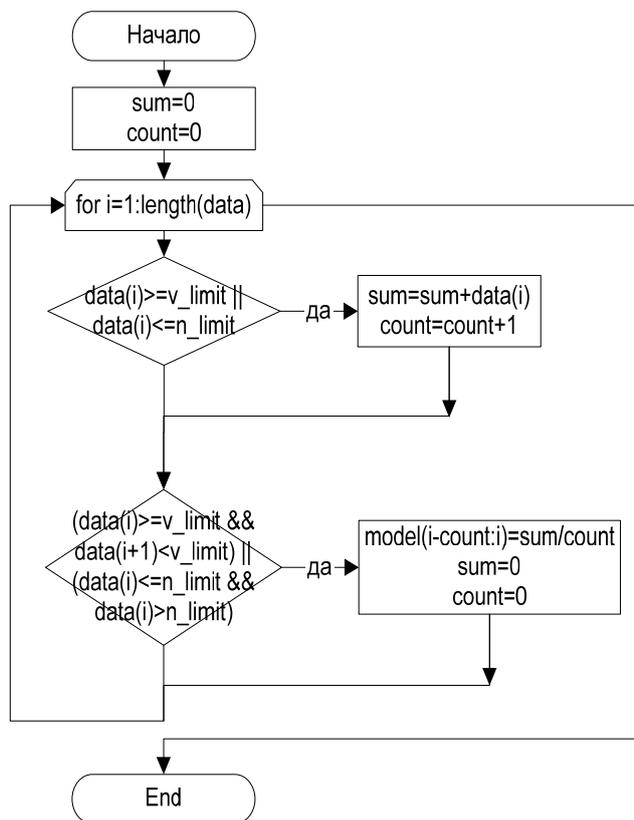


Рис.6. Блок-схема алгоритма построения модели крутящего момента.

Для выделения полезного сигнала (полезного крутящего момента и полезной осевой силы резания) по формуле (1) находят разность между средними его значениями (уровни А и В на рис.5,в). Эту разность находят дважды: на фронте и срезе сигнала, соответственно. Например, 30-ти просверленным отверстиям будет соответствовать 60 точек, характеризующих полезный сигнал (нижний график на рис.7).

В соответствии с моделью формирования разности уровней сигнала формируют массив измерительной информации, характеризующий изменение полезного сигнала во время работы станка (рис.5,г). Заключительным этапом моделирования сигнала является выделение соответствующего тренда, характеризующего работу сверла во времени.

Это может быть линейная или полиномиальная (рис.5,д) аппроксимация этого сигнала.

Рассмотрим работу блоков программы и соответствующие им функции более подробно. После загрузки программы (второй *m*-файл) открывается пользовательское окно (рис.7), в котором доступной является только кнопка «Загру-

зять данные». При нажатии этой кнопки осуществляется выполнение функций блока 1 на рис.4. Происходит открытие диалогового окна для выбора файла с данными. При выборе этого файла выполняется конструирование его полного имени, считывание и сохранение данных из него с полученным (при конструировании) именем. Далее в соответствии с алгоритмом выполняется построение графика данных этого файла и становление свойства «доступность» для полей ввода данных «Верхняя граница», «Нижняя граница» и кнопки «Построить модель» (рис.7).

Опытным путем (для конкретных данных) определяют верхнюю и нижнюю границы, которые представляют собой предельные значения (пороги) сигналов при нагрузке инструмента и в режиме его холостого хода (ВП и НП на рис.5,в). Эти пороги вводят в соответствующие поля для ввода данных: «Верхняя граница» (верхний порог) и «Нижняя граница» (нижний порог).

При нажатии кнопки «Построить модель» (рис.7) начинается выполнение функций блока 3 на рис.4. Выполняется функция построения модели исходных данных (рис.5, в). На график исходных данных (линия 1 на рис.7), содержащий верхнюю и нижнюю границы (пороги) сигнала (линии 2, 3 на рис.7), накладывается другой график. Он соответствует модели сигнала на рис.5,в. После этого, устанавливается свойство «доступность» для кнопки «Построить график».

При нажатии кнопки «Построить график» (рис.7), начинается выполнение функций соответствующих блоку 4 на рис.4. По формуле (1) вычисляется, например, полезный крутящий момент, строится его график (линия 4 на рис.7 показывает изменение этого сигнала за время работы сверла) и устанавливается свойство «доступность» для кнопки «Построить тренд».

Нажатие кнопки «Построить тренд» (рис.7), приводит к выполнению функции определения параметров этого тренда (уравнение в нижней части рис.7) и построению графика полученного тренда (линия 5 на рис.7).

Заключительным этапом работы рассматриваемой программы является сохранение данных. При нажатии кнопки «Сохранить данные» (рис.7) осуществляется открытие диалогового окна для определения места и имени файла, в котором сохраняются данные с расширением *xls*.

Описанная компьютерная технология преобразования измерительных данных была применена при сравнительном исследовании семи видов твердых технологических смазок на основе стеарина. При сверлении отверстий (глубина сверления 10 мм) на координатно-расточном станке с ЧПУ «Flex NC» измеряли и фиксировали два сигнала, характеризующих процесс сверления: крутящий момент на шпинделе и осевую силу резания. Заготовка: образец из стали 35 (НВ 190...210). Режимы сверления: частота вращения сверла $n = 2000$ об/мин; подача $S = 50$ мм/мин. Сверла: сталь P18, диаметр 2,85 мм. Количество просверленных отверстий с ТТС – 30 шт.

Для повышения надежности экспериментальных данных каждый опыт повторяли три раза с дальнейшим усреднением результата. На основании сравнения разных составов ТТС по обобщенным зависимостям (график 5 на рис.7) были выбраны наиболее эффективные составы, которые существенно снижали полезный крутящий момент и полезную осевую силу резания.

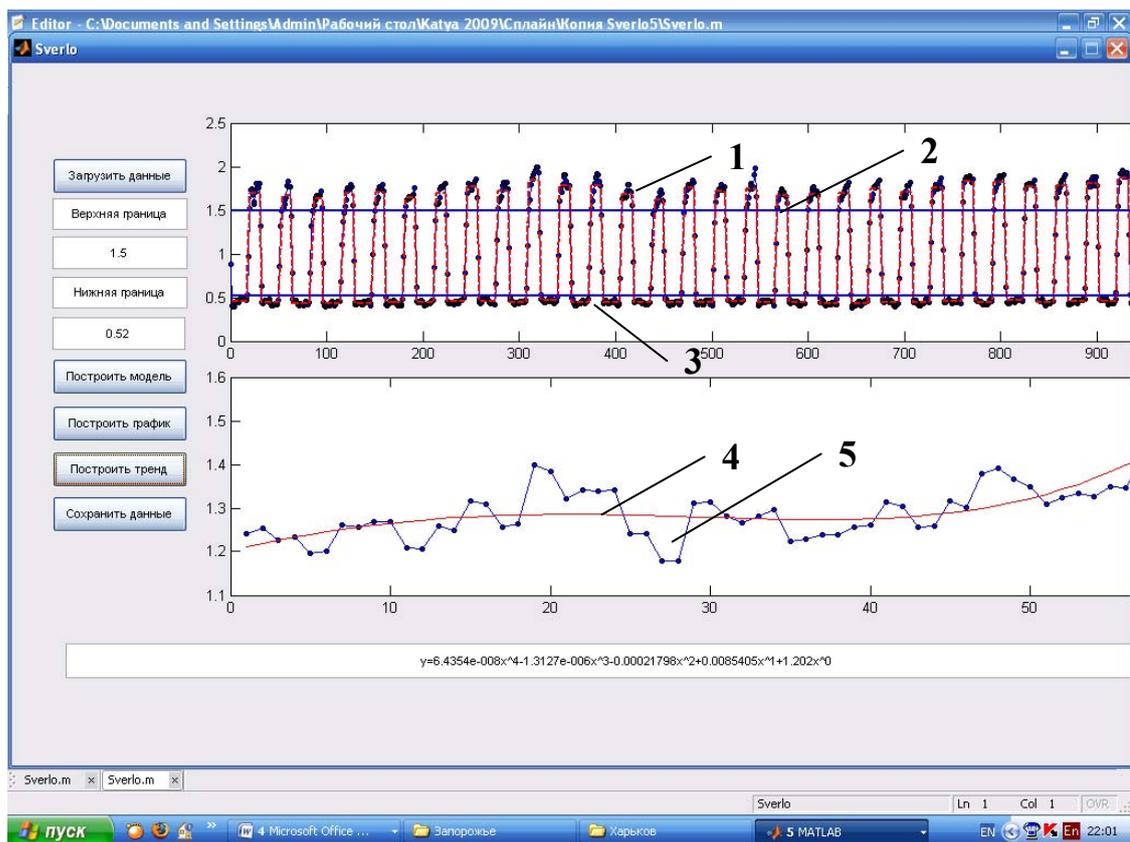


Рис.7. Математические модели и уровни сигнала, характеризующие крутящий момент: суммарный (осциллограмма 1); верхний (линия 2) и нижний (линия 3) пороги; полезный крутящий момент (график 4) и его тренд (график 5).

Литература: 1. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. – 684с. 2. Дьяконов В.П. MATLAB 6/5 SP1/7.0+Simulink 5/6. Основы применения. Серия «Библиотека профессионала». – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 800 с.

УДК 621.9.079(058)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЁРДЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СМАЗОК ПРИ СВЕРЛЕНИИ

Ларшин В.П., докт. техн. наук, Лищенко Н.В., канд. техн. наук

Рыбалко А.П., канд. техн. наук (г. Одесса, Украина)

The solid cutting lubricants comparative experimental studies results in drilling on the CNC machine tool are given.

Ресурс стойкости режущего инструмента (РИ) относится к одному из важнейших технологических резервов повышения производительности лезвийной и абразивной обработки резанием при требуемой (по чертежу) шероховатости поверхностей детали, точности их размеров, формы и взаимного расположения. Известны следующие основные направления повышения стойкости РИ.

Первое направление – это использование эффективных технологий получения высокопрочных твердых сплавов (например, технология градиентного спекания) и нанесение на них специальных износостойких покрытий (TiCN, TiCN-Al₂O₃-TiN) с последующей полировкой этих покрытий для уменьшения

внутренних растягивающих напряжений (low stress coating) [1].

Второе направление – выбор и применение при обработке эффективных смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС): жидких, твёрдых и газообразных. Тип СОТС зависит от исходной связующей основы (вода, минеральное или синтетическое масло, жирные насыщенные и ненасыщенные органические кислоты). СОТС оказывает охлаждающее, смазочное, моющее, химическое и адсорбционное действие.

Известно, что в ряде случаев применение жидких СОТС затруднено или недопустимо. В таких случаях применяют твердые технологические смазки (ТТС). Это имеет место при работе на станках, не оснащенных системой подвода жидких СОТС (сверление, шлифование), а также в случае, когда жидкие СОТС не допустимы. Например, в ряде случаев применение жидких СОТС приводит к появлению микротрещин на обрабатываемой поверхности или закрывает её обзор (зубошлифование тарельчатыми кругами на станках типа МААГ, заточка режущего инструмента и т.п.). В литературе не нашло должного отражения направление, связанное с применением твердых технологических смазок (ТТС) при сверлении мелких отверстий и при шлифовании «всухую». При сверлении мелких отверстий (диаметром меньше 5 мм) сверла не требуют дополнительного охлаждения, поскольку выделяющееся при резании тепло поглощается обрабатываемой заготовкой (вокруг работающего сверла металлическая окружающая среда, которая как радиатор отводит тепло). В то же время применяемые составы ТТС оказывают существенное влияние на смазочное, химическое и адсорбционное действие. Чаще всего ТТС наносят на рабочую поверхность инструмента (сверло, метчик, абразивный круг) механически. Абразивные круги могут быть также пропитаны (импрегнированы) разогретыми (до температуры плавления) составами ТТС. В качестве компонентов ТТС применяют: графит, нитрид бора, тальк, дисульфид (или диселенид) молибдена, серу и т.д.

Третьим перспективным направлением повышения стойкости режущего инструмента является принципиально новый подход, основанный на применении смазочных ремонтно-восстановительных составов на основе, например, серпентинита. Такие составы позволяют не только снизить трение между режущим инструментом и заготовкой, но также восстанавливать (наращивать) изнашиваемый контур лезвия инструмента благодаря возникающему в зоне резания эффекту избирательного переноса серпентинита на изношенные участки инструмента в условиях высоких давлений и температур в зоне контакта.

Известен ряд ресурсовосстанавливающих составов и композиций, применяемых в конструкционных смазочных материалах, например:

- 1) антифрикционная ресурсовосстанавливающая композиция (АРВК), ООО «Венчур-Н», г. Зеленоград, Россия;
- 2) противоизносный антифрикционный (ПИАФ) ремонтно-восстанавливающий состав, НПО «Промышленный технопарк», г. Москва, Россия;
- 3) ремонтно-восстанавливающий состав (РВС), НПО «Руспромремонт»,
- 4) г. Санкт-Петербург, Россия;
- 5) силикатно-керамическая композиция Megaforce, ООО НПП «Триботех», г. Санкт-Петербург, Россия;

- 6) триботехнические составы (ТС) для направленной ионной диффузии (НИоД), Россия;
- 7) нанокерамика ФОРСАН, Компания «Нанопром», г. Москва, Россия;
- 8) ХАДО («Харьковский Дом», г. Харьков, Украина).

Большую группу ТТС составляют составы на основе жирных органических кислот, например, на основе стеариновой кислоты, а также на основе смеси стеариновой и олеиновой кислот [2].

Возникает задача проведения сравнительного анализа различных ТТС с целью определения наиболее эффективных их составов, например, на операции сверления мелкогабаритных отверстий (диаметром до 5 мм). Исходным материалом для этого анализа являются результаты измерения параметров, характеризующих процесс резания. Например, при сверлении мелких отверстий, к числу таких параметров относятся крутящий момент резания на сверле и осевая сила резания.

Для проведения такого анализа необходимо иметь соответствующие инструментальные средства, встроенные в металлорежущий станок, и обладающие необходимой чувствительностью и линейностью характеристик первичных преобразователей информации. Отсутствие таких средств или их низкое качество не позволяет получить достоверные результаты об эффективности процесса резания с применением разных составов ТТС.

Испытания проводились на координатно-расточном станке, оснащенном системой ЧПУ «Flex NC» производства фирмы «Станкоцентр» (г. Москва) при сверлении глухих отверстий (длина сверления 10 мм) в заготовке из стали 35 (НВ 190...210). Режимы сверления: частота вращения сверла 2000 об/мин; вертикальная подача 50 мм/мин. Сверла: сталь Р18, диаметр 2,85 мм. Количество просверленных отверстий для каждой рецептуры ТТС – 30 шт. Для повышения надежности экспериментальных данных каждый опыт повторяли три раза с дальнейшим усреднением результата. Испытаны следующие семь рецептур (ТТС № 1...ТТС № 7), представленные ниже.

ТТС № 1
 Масло И-20.....15 %
 Олеиновая кислота20 %
 Стеарин.....остальное.

ТТС № 2
 Масло И-20.....10 %
 Олеиновая кислота20 %
 АРВК (ООО «Венчур-Н»).....2 %
 Стеарин.....остальное.

ТТС № 3
 Масло И-20.....30 %
 Сера.....40 %
 Стеарин.....остальное.

ТТС № 4
 Масло И-20.....3 %
 Окись хрома.....20 %
 Стеарин.....остальное.

ТТС № 5
 1. Масло И-20.....2-3 %
 2. Сера техническая.....30-40 %
 3. Диселенид молибдена....10-20 %
 4. Полиизобутилен.....0,5-1 %
 5. Стеарин.....остальное.

ТТС № 6
 1. Стеариновая кислота....60-65 %
 2. Олеиновая кислота.....20 -25%
 3. Ацетанилид.....остальное.

ТТС № 7
 1. Масло И-20.....10 %
 2. Олеиновая кислота20 %
 3. Серпентинит3 %

Среди перечисленных составов ТТС имелись новые ранее не испытанные составы: ТТС № 1, ТТС № 2 и ТТС № 7. Причем, ТТС № 2 и ТТС № 7 имеют общую связующую основу, какой является ТТС № 1. Такой подход позволяет установить влияние дополнительных (по отношению к ТТС № 1) компонентов. Этими компонентами являются трибополимеробразующая присадка ЭФ-357 и ресурсовосстанавливающее вещество на основе природного силиката магния (серпентинит) [3].

В процессе эксперимента измеряли с частотой 200 Гц крутящий момент и осевую силу резания при сверлении. В качестве сигналов крутящего момента и осевой силы резания использовали квадратурные токи соответствующих приводов станка: привода главного движения и привода вертикальной подачи. Эти сигналы используются в указанных приводах для прецизионного автоматического регулирования частоты вращения соответствующих асинхронных электродвигателей. В системе ЧПУ «Flex NC» эти сигналы сделаны доступными для проведения диагностики технологической системы механической обработки. При работе станка автоматически формируются файлы, содержащие измерительную информацию в формате *ppl*.

Методика обработки измерительной информации содержала следующие этапы.

1. В приложении Excel открыть первичный файл измерительных данных (с расширением *ppl*), в котором удалить служебную информацию.
2. Выбрать вид аппроксимирующей зависимости необходимой для решения задачи (например, «скользящее усреднение», позволяющее выделить тренд из текущих высокочастотных измерений).
3. Так как в приложении Excel исходные файлы данных (*ppl*) ограничены количеством точек измерений (60766), объединить эти файлы в единый файл с помощью менеджера файлов, каким может быть, например, FAR manager.
4. В среде MATLAB создать *m*-файл (программа на языке MATLAB), в котором реализован выбранный алгоритм обработки данных (скользящее усреднение). Для обработки полученного единого файла запустить программу MATLAB, в рабочем окне которого необходимо ввести название *m*-файла и единого файла (*ppl*). Полученный после обработки окончательный файл (читается в приложении Excel) имеет два столбца новых данных, соответствующих двум информационным сигналам: крутящему моменту и осевой силе резания.
5. В среде MATLAB создают *m*-файл, который позволяет из информации, имеющейся в файле, полученном в п.4, выделить тренд изменения полезного крутящего момента резания и полезной осевой силы резания. Таким образом, можно проследить изменение этих сигналов в пределах сверления 30-ти отверстий.

Результатом применения описанной методики обработки сигналов являются графики изменения полезного крутящего момента (\dot{I} на рис.1) и полезной осевой силы ($P_{i\dot{n}}$ на рис.2) резания в зависимости от времени работы сверла,

которое пропорционально количеству точек измерения (параметр N на оси абсцисс).

Количество точек измерения (60) на рис.1 и рис.2 в два раза больше количества просверленных отверстий (30), так как полезный уровень сигналов \dot{I} и $P_{\dot{I}\dot{n}}$ определяют дважды при сверлении одного отверстия (в моменты начала и окончания резания). Это позволяет учесть нестабильность уровня сигнала холостого хода, например, сигнала $\dot{I}_{\delta\delta}$.

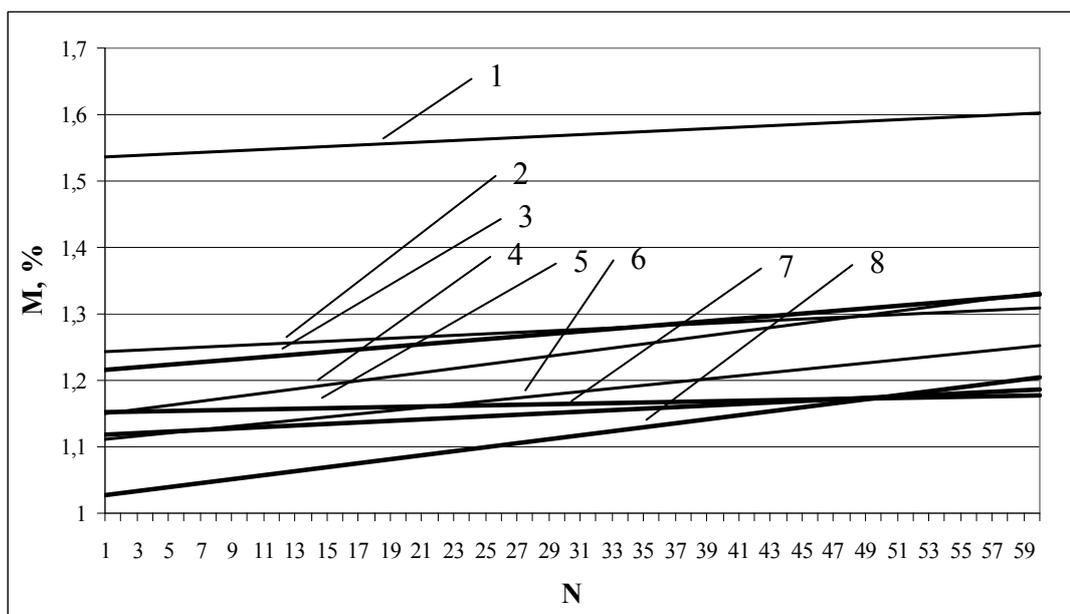


Рис.1. Изменение полезного крутящего момента при сверлении: 1 – резание «всухую»; 2 – ТТС № 4; 3 – ТТС № 2; 4 – ТТС № 1; 5 – ТТС № 6; 6 – ТТС № 5; 7 – ТТС № 7; 8 – ТТС № 3.

В соответствии с принятым алгоритмом определяют разность между двумя крутящими моментами на шпинделе: суммарным при сверлении (\dot{I}_{Σ}) и тем, который имеется на том же шпинделе при отсутствии сверления (в режиме холостого хода, $\dot{I}_{\delta\delta}$). Эту разность ($M_{\Sigma} - M_{\delta\delta}$) определяют до начала резания и после его окончания, т.е. два раза при сверлении одного отверстия. Уровень $\dot{I}_{\delta\delta}$ не является постоянным, например, в связи с прогревом механизмов привода (нагретые за время резания детали механизмов имеют изменённые силы взаимодействия, за время холостого хода они охлаждаются т.д.). Аналогичные рассуждения можно привести по отношению к осевой (вертикальной) силе резания (рис.2).

Анализ рис.1 и рис.2 показывает, что с увеличением времени работы сверла (номера точки измерения по оси абсцисс) полезный крутящий момент \dot{I} (рис.1) и осевая сила резания ($P_{\dot{I}\dot{n}}$ на рис.2) пропорционально возрастают на 4 – 16 % и на 1 – 4 %, соответственно. Разрешающая способность измерительной системы для параметров M и $P_{\dot{I}\dot{n}}$ составляет 0,1 % и 0,05 %. Это поз-

воляет надежно выявить различие в указанных параметрах для разных составов ТТС. Видно, что наибольшие значения M и $P_{i\dot{n}}$ имеют место при резании «всухую» (линия 1 на рис.1 и рис.2), т.е. без использования смазок, а наименьшие – при использовании составов ТТС, содержащих серпентинит, серу и диселенид молибдена (линии 6, 7, 8 на рис.1 и рис.2).

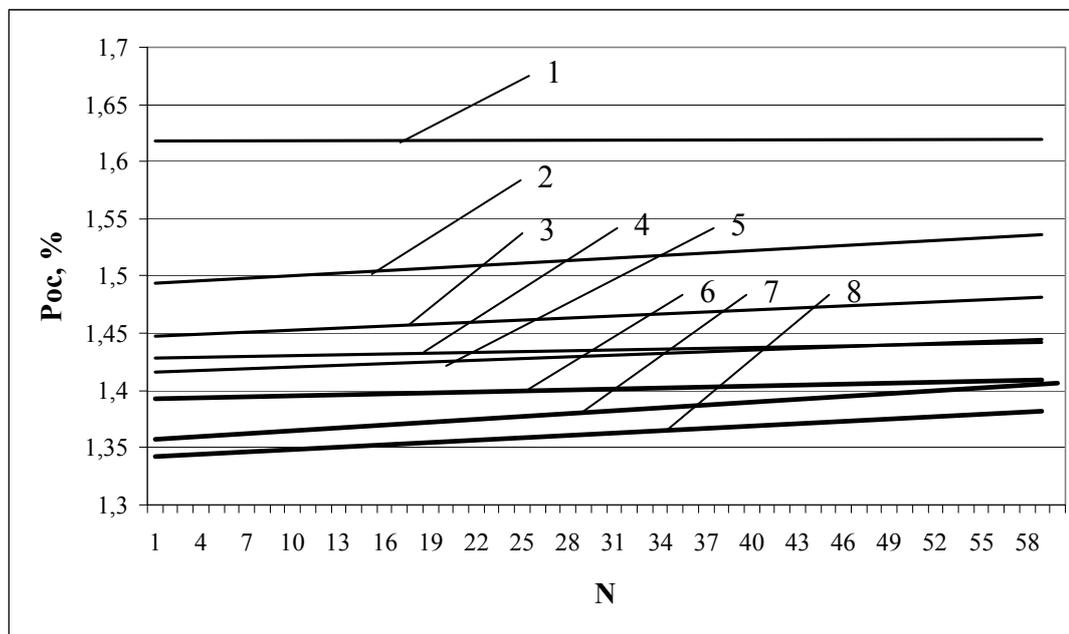


Рис.2. Изменение осевой силы резания при сверлении: 1 – резание «всухую»; 2 – ТТС № 2; 3 – ТТС № 1; 4 – ТТС № 4; 5 – ТТС № 6; 6 – ТТС № 3; 7 – ТТС № 5; 8 – ТТС № 7.

С увеличением времени работы сверла параметры M и $P_{i\dot{n}}$ для разных составов ТТС сближаются. Например, на рис. 1 линии 2 и 3 сближаются при $N = 30$, а линии 3 и 4 – при $N = 54$. Другими словами разные составы ТТС через некоторое время работы сверла могут сопровождаться одинаковыми параметрами M и $P_{i\dot{n}}$.

Очевидно, что наиболее эффективными составами ТТС являются такие, при которых параметры M и $P_{i\dot{n}}$ принимают наименьшее значение. Как видно из приведенных рисунков к числу таких составов ТТС относятся составы № 3, 5, 7. Следовательно, дальнейшие исследования необходимо проводить с использованием этих составов.

Литература: 1. Пластины нового поколения. Мир станочника / www.mirstan.ru/index.php?page=art_2. 2. Ларшин В.П., Бажанов О.И., Ліценко Н.В. Підвищення ефективності мастильно-охолоджувальних технологічних засобів / Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: материалы научн.-техн. конф.– 19-20 мая 2009 г., Одесса. – Киев: АТМ України.– 2009. – С. 88-92. 3. Патент 2237704 Российская Федерация, МПК С10М129/02, С10М105/00, С10М125:26, С10N30:06 Антифрикционная противоизносная суспензия / Буяновский И.А., Гостев Ю.В., Дроздов Ю.Н., Заславский Р.Н., Новиков В.И.; заявитель и патентообладатель ООО «Венчур-Н», Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. – № 2003124124/04; заяв. 05.08.03; опубл. 10.10.04.

УДК 621.9.01

РАСПОЗНАВАНИЕ КЛАССОВ ФОРМОИЗМЕНЕНИЙ РЕЖУЩИХ КРОМОК И РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РЕЗЦОВ ПРИ ИХ ИЗНОСЕ

Деревянченко А.Г., докт. техн. наук., Бовнегра Л.В., канд. техн. наук.,

Гнатюк А.П., канд. техн. наук., Фомин А.А., канд. техн. наук.,

Павленко В.Д., канд. техн. наук. (г. Одесса, Украина)

Is devoted to recognition of classes forming the cutting edges and working surfaces of incisors in their wear.

Непрерывный рост требований к качеству обработки на станках класса ГПМ обуславливает необходимость создания систем поддержания работоспособности режущих инструментов (РИ) [1]. Режущие инструменты в структуре ГПМ относятся к объектам повышенного контроля, поскольку, вследствие интенсивного износа они быстро теряют работоспособность и переходят в состояние отказа. Изнашивание РИ сопровождается существенными формоизменениями режущих кромок (РК) и рабочих поверхностей (РП), причем каждому классу формоизменений соответствует определенная модель отказа инструмента. Идентификация модели отказа уже в начальный период эксплуатации РИ обеспечивает возможность прогнозирования его остаточного ресурса, поэтому разработка системы автоматизированного распознавания классов (САРК) формоизменений РК и РП представляется актуальной. Целью данной статьи является представление ряда результатов работы такой системы, созданной в ОНПУ.

В периоды прерывания обработки производится регистрация первичных образов зон износа (цифровых изображений) РИ с использованием системы технического зрения, входящей в состав САРК [1]. При оценке состояний РК эти изображения представляют собой проекции на основную (R_V) и рабочую (R_S) плоскости режущих кромок в исходном (L_3^0) и текущем (L_3^T) состояниях - $P_{R_V}^{L_3^0}, P_{R_V}^{L_3^T}, P_{R_S}^{L_3^0}, P_{R_S}^{L_3^T}$. При оценке состояний РП регистрируются изображения передней (L_1^0, L_1^T) и обобщенной задней (L_2^0, L_2^T) поверхностей РИ - $P_{R_V}^{L_1^0}, P_{R_V}^{L_1^T}, P_{R_S}^{L_2^0}, P_{R_S}^{L_2^T}$. Оценка текущей формы кромок производится, как правило, с учетом их исходной формы и пространственного положения. Поэтому представляется целесообразным формирование так называемого обобщенного контура активного участка РК – ОКРК (k^T). Можно записать: $k^T \in L_3^0 \cup L_3^T$; $P_{R_V}^{k^T} \in P_{R_V}^{L_3^0} \cup P_{R_V}^{L_3^T}$; $P_{R_S}^{k^T} \in P_{R_S}^{L_3^0} \cup P_{R_S}^{L_3^T}$. При различных тенденциях изнашивания РИ формируются различные ОКРК, каждый из которых характерен присутствием следов дефектов (формоизменений РК) определенного типа (рис.1). Выделены классы контуров с равномерным смещением РК - $\Omega_1^{ОКРК}$, со следами проточин ($\Omega_2^{ОКРК}, \Omega_3^{ОКРК}$) и др. Автоматизированное распознавание классов ОКРК для нескольких последовательных состояний РИ обеспечивает возможность идентификации модели отказа РИ. Для упрощения процесса фор-

мирования вектора признаков состояний РИ (x^T) выполняются различные проективные преобразования ОКРК (Ψ^k).

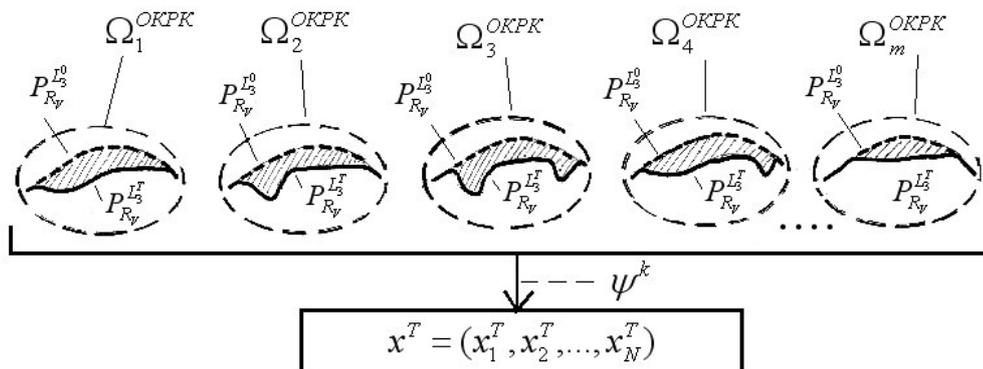


Рис. 1. Схематическое представление классов формоизменений РК резцов для тонкого точения.

Распознавание классов формоизменений РК актуально в условиях финишной обработки. При чистовом точении становится необходимой оценка формоизменений РП резцов, и в первую очередь – распознавание классов формы обобщенной зоны износа задних поверхностей (A_2^T). Укажем некоторые из этих классов.

Класс 1 ($C_1^{A_2^T}$) – контур зоны A_2^T расположен при вершине РИ и близок к симметричному. Если площадь зоны A_2^T меньше предельной, РИ работоспособен ($C_1^{A_2^T} \subset C_P^{A_2^T}$), в обратном случае – неработоспособен, т. е. РИ находится в состоянии отказа ($C_1^{A_2^T} \subset C_H^{A_2^T}$). Класс 2 ($C_2^{A_2^T}$) – зона A_2^T образовался при вершине резца и вдоль главной режущей кромки. Степень работоспособности РИ определяется площадью зоны A_2^T и положением ее экстремума относительно вершины РИ. Класс 3 ($C_3^{A_2^T}$) – контур зоны A_2^T равномерно распределен вдоль главной режущей кромки. Если площадь зоны A_2^T меньше предельной, РИ работоспособен ($C_3^{A_2^T} \subset C_P^{A_2^T}$), в обратном случае – неработоспособен ($C_3^{A_2^T} \subset C_H^{A_2^T}$). Класс 4 ($C_4^{A_2^T}$) – зона A_2^T включает проточину на главной режущей кромке. Степень работоспособности РИ определяется параметрами проточки и ее положением относительно вершины РИ. Класс 5 ($C_5^{A_2^T}$) – зона A_2^T включает проточки на главной и вспомогательной режущей кромке. Степень работоспособности РИ определяется параметрами проточин и их положением относительно вершины РИ.

Такая классификация формы макродефекта задней поверхности (A_2^T) является лишь одним вариантом из множества возможных.

С использованием специального программного комплекса производилась обработка цифровых изображений (первичных образов) зон износа. После выделения контура зоны A_2^T определялась его ориентация в инструментальной системе координат, вычислялся ряд первичных геометрических параметров –

линейные размеры, площадь, периметр, координаты центра тяжести, моменты инерции. Далее находили специальные признаки формы контура – кривизну, компактность, и определяли ряд признаков путем нормирования первичных параметров. В итоге вектор формы контура зоны A_2^T включал 12 признаков ($x_1^T - x_{12}^T$). В таблице 1 приведены фрагменты наборов признаков для трех классов формы зоны A_2^T (получены путем обработки экспериментальных данных).

Таблица 1

Наборы признаков формы контуров зоны износа задней поверхности резцов

№ РИ	Значения признаков формы контура зоны износа A_2^T											
	x_1^T	x_2^T	x_3^T	x_4^T	x_5^T	x_6^T	x_7^T	x_8^T	x_9^T	x_{10}^T	x_{11}^T	x_{12}^T
Класс 1 - износ при вершине												
1	0.65	1.55	0.07	0.02	0.69	0.55	0.06	0.13	0.005	13.61	0.08	0.25
2	0.64	1.56	0.07	0.02	0.69	0.55	0.06	0.13	0.005	13.60	0.08	0.20
3	0.67	1.49	0.32	0.02	0.71	0.73	0.07	0.07	0.004	15.63	0.07	0.18
4	0.64	1.59	0.08	0.02	0.82	0.54	0.06	0.14	0.006	12.97	0.09	0.30
5	0.63	1.58	0.08	0.02	0.86	0.61	0.06	0.14	0.006	12.92	0.09	0.27
6	0.61	1.64	0.09	0.02	0.81	0.64	0.06	0.15	0.006	13.20	0.09	0.31
7	0.64	1.56	0.07	0.04	0.63	0.62	0.10	0.10	0.008	11.35	0.10	0.17
Класс 2 - износ при вершине и вдоль одной из граней												
1	0.51	1.98	0.07	0.02	0.65	0.56	0.09	0.07	0.004	14.92	0.08	0.21
2	0.42	2.39	0.07	0.02	0.61	0.64	0.10	0.07	0.005	14.46	0.08	0.24
3	0.43	2.34	0.08	0.02	0.64	0.60	0.13	0.07	0.005	13.85	0.08	0.25
4	0.52	1.94	0.07	0.03	0.68	0.52	0.10	0.10	0.006	12.60	0.09	0.19
5	0.55	1.83	0.05	0.01	0.74	0.52	0.09	0.06	0.003	17.73	0.06	0.26
6	0.54	1.85	0.07	0.02	0.62	0.59	0.12	0.06	0.004	15.34	0.07	0.23
7	0.52	1.93	0.08	0.03	0.65	0.65	0.11	0.08	0.006	13.01	0.09	0.20
Класс 3 - равномерный износ												
1	0.77	1.29	0.08	0.02	0.57	0.66	0.16	0.05	0.007	11.47	0.10	0.28
2	0.79	1.27	0.09	0.02	0.63	0.64	0.16	0.06	0.008	11.19	0.11	0.27
3	0.56	1.75	0.09	0.01	0.60	0.66	0.16	0.02	0.003	17.43	0.07	0.60
4	0.69	1.43	0.08	0.02	0.62	0.62	0.17	0.03	0.005	14.28	0.08	0.40
5	0.72	1.38	0.10	0.02	0.62	0.70	0.18	0.04	0.005	13.46	0.08	0.39

Большое количество признаков значительно усложняет процесс распознавания. Поэтому проводилось сокращение размерности признакового пространства с учетом оценки информативности признаков и процента правильного распознавания (ППР). Анализ ряда методов распознавания образов позволил установить, что наиболее приемлемым для условий решаемой задачи является модифицированный метод статистического распознавания [2, 3]. В таблице 2 приведены фрагменты результатов распознавания с использованием данных, приведенных в табл. 1. Производился перебор всех возможных сочетаний признаков. Приняты обозначения: P_1 - процент правильного распознавания первого уровня, т.е. отделения состояний РИ класса 1 от классов 2, 3; P_2 - процент правильного распознавания второго уровня, т.е. отделения состояний РИ класса 2 от класса 3. Нумерация признаков смещена на единицу (в связи со спецификой

их представления при вводе в ПЭВМ).

Таблица 2

Выборка из протокола результатов распознавания формы контуров зон A_2^T при переборе всех возможных сочетаний признаков

№	Номера признаков	P ₁	P ₂	Средний ППР	№	Номера признаков	P ₁	P ₂	Средний ППР
1	0	86,67	97,50	92,08	261	6 10 11	78,33	100,00	89,17
2	1	85,00	97,50	91,25	262	3 10 11	80,00	97,50	88,75
3	7	85,00	92,50	88,75	263	4 5 10	90,00	87,50	88,75
4	11	76,67	92,50	84,58	264	8 9 11	80,00	97,50	88,75
5	6	66,67	97,50	82,08	265	2 3 5	86,67	90,00	88,33
6	4	80,00	77,50	78,75	266	2 4 9	86,67	90,00	88,33
7	5	68,33	82,50	75,42	267	2 4 10	86,67	90,00	88,33
8	2	73,33	75,00	74,17	268	4 5 8	86,67	90,00	88,33
9	8	78,33	65,00	71,67	269	4 5 9	88,33	87,50	87,92
10	9	78,33	65,00	71,67	270	3 5 8	85,00	90,00	87,50
11	3	78,33	60,00	69,17	271	2 5 6	73,33	100,00	86,67
12	10	73,33	62,50	67,92	272	2 5 8	83,33	90,00	86,67
13	1 3	95,00	100,00	97,50	273	2 6 11	73,33	100,00	86,67
14	1 7	95,00	100,00	97,50	274	6 9 11	73,33	100,00	86,67
15	1 11	95,00	100,00	97,50					
					302	0 1 5 11	98,33	100,00	99,17
71	5 9	73,33	85,00	79,17	303	0 2 8 9	98,33	100,00	99,17
72	2 9	75,00	82,50	78,75	304	0 2 8 10	98,33	100,00	99,17
73	3 8	80,00	75,00	77,50	305	0 4 5 11	98,33	100,00	99,17
74	3 10	78,33	75,00	76,67	306	0 4 8 9	98,33	100,00	99,17
75	3 9	80,00	72,50	76,25	307	1 2 3 10	98,33	100,00	99,17
76	8 9	80,00	72,50	76,25	308	1 2 4 9	98,33	100,00	99,17
77	9 10	78,33	70,00	74,17	309	1 2 6 11	98,33	100,00	99,17
78	8 10	80,00	67,50	73,75	310	1 2 9 11	98,33	100,00	99,17
79	1 5 11	98,33	100,00	99,17	311	1 2 10 11	98,33	100,00	99,17
80	1 2 11	96,67	100,00	98,33	312	1 4;5 11	98,33	100,00	99,17
81	1 5 6	96,67	100,00	98,33	313	1 5 6 9	98,33	100,00	99,17
82	1 5 7	96,67	100,00	98,33	314	1 5 8 11	98,33	100,00	99,17

Анализ результатов показал, что при использовании модифицированного метода статистического распознавания качество правильного распознавания трех классов формы зоны A_2^T находится в диапазоне 95 - 98% (для четырех признаков). Это позволяет рекомендовать метод для автоматизированного распознавания состояний режущей части РИ. Распознавание выделенных классов формоизменений РК и РП с применением разработанной САРК обеспечит, по мнению авторов, возможность идентификации моделей отказа резцов уже в начальный период эксплуатации и прогнозирования их остаточного ресурса.

Литература: 1. Деревянченко А.Г., Павленко В.Д., Андреев А.В. Диагностирование состояний режущих инструментов при прецизионной обработке. – Одесса: Астропринт. – 1999. – 184 с. 2. Методы и средства построения классификатора состояний режущих инструментов / А.Г. Деревянченко, В.Д. Павленко, А.А. Фомин, Л.В. Бовнегра, С.В. Павленко // Современные технологии в машиностроении: К юбилею Ф.Я. Якубова. Сборник науч. статей – Харьков: НТУ “ХПИ”. 2007. – С. 46-55. 3. Концепция создания экспертной системы для информационного обеспечения многоуровневого автоматизированного диагностирования состояний инструментов / А.Г. Деревянченко, В.Д. Павленко, А.А. Фомин, Л.В. Бовнегра, Д.А. Криницын. // Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць НТУ “ХПИ”. – Харків, 2008. – Вип. 1(16). – С. 94-103.

ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Радченко С.Г., канд. техн. наук (г. Киев, Украина)

The technology of creation and perfection of complex systems by using multicriterion compromise optimization and multifactor mathematical modeling has been stated. The obtained results of using technology when elaborating engineering, measuring and technological systems are presented.

Для современного этапа развития науки определяющими тенденциями являются технологизация фундаментальных и прикладных исследований и развитие информационных технологий. Новые проблемы и вытекающие из них задачи таковы, что решать их старыми методами и технологиями невозможно. Современные информационные технологии предназначены для принципиально новых решений задач и проблем в науке, производстве, образовании и т. д.

В основе информационной технологии создания и совершенствования сложных систем лежат

1. Многокритериальная компромиссная оптимизация.
2. Многофакторное математическое моделирование.

Оптимизация и математическое моделирование сложных систем требуют выполнения специальных исследований: выбор управляемых факторов, которые влияют на отклики (критерии качества систем: надежность, производительность, ресурс работы, точность, материальные и энергетические затраты, прочность и др.); генерирование планов экспериментов; проведение экспериментов; обработка полученных результатов экспериментов и интерпретация полученной информации.

При решении указанных задач следует учитывать специфику получения необходимой информации о сложных системах. Она заключается в следующем [1, с. 19–24].

Оптимизация сложных систем (технических, технологических) с использованием теоретического подхода не всегда возможна. Эффективным и доступным методом является использование поисковой оптимизации по результатам проведенных экспериментов. Известны несколько десятков методов оптимизации. Наиболее эффективный метод – случайный поиск (СП) набросового типа с использованием ЛП_r равномерно распределенных последовательностей.

Случайный поиск характеризуется следующими преимуществами:

1. Экономичность по использованию необходимых ресурсов – числа экспериментов N .
2. Эффективность поиска экстремума по факторам и критериям качества (откликам).
3. Возможность нахождения глобального экстремума.
4. Решение задач со многими (десятки) факторами и критериями качества (системность).
5. Возможность оптимизации с ограничениями по факторам и критериям качества.

Значительные возможности в прогнозировании, управлении и совершен-

ствовании различных систем открывает и использование многофакторных математических моделей. Они могут быть применены для повышения качества выпускаемой продукции, сокращения потребления сырья, энергоносителей, производственных площадей, рабочего времени и создания системных ресурсов – функциональных, оптимизационных, целевых.

Получение математических моделей сложных систем с использованием теоретико-аналитического подхода не всегда возможно по причинам сложности и новизны систем. Преимущество разработанной методологии получения многофакторных статистических моделей состоит в следующем.

1. Возможность системного решения задач по сложным, новым, слабо изученным системам, процессам.
2. Получение моделей с наилучшими возможными критериями качества.
3. Решение некорректно поставленных статистических задач в условиях априорной неопределенности и исходной мультиколлинеарности факторов [2, с. 211–327].
4. Возможность решения задач «на потоке» с использованием разработанного ПС ПРИАМ.

На кафедре «Технология машиностроения» Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт» разработано программное обеспечение для проведения многокритериальной оптимизации и построения многофакторных статистических моделей.

- 1) Программное средство «Планирование, регрессия и анализ моделей» (ПС ПРИАМ). Оно предназначено для выполнения комплекса работ, связанных с генерацией многофакторных планов экспериментов для многокритериальной оптимизации и многофакторного математического моделирования, обработки их результатов с использованием прикладной статистики, проведения вычислительного эксперимента, визуализации полученных результатов [2, с. 45-47]. ПС ПРИАМ можно использовать при решении разнообразных научных, прикладных задач с технологическими, техническими, материаловедческими, измерительными и другими системами. Его использование возможно при решении конструкторских, технологических, испытательных, эксплуатационных задач; в учебном процессе, в научно-исследовательской работе. С основными характеристиками ПС ПРИАМ можно ознакомиться в интернете [3].
- 2) Программный продукт OptimeChoice. Позволяет автоматизировать решение задачи многокритериального сравнения с целью ранжирования сравниваемых между собой объектов. Возможны введение весовых коэффициентов по каждому критерию, выбор наилучшего объекта с учетом значимости критериев, моделирование повышения качества объекта с учетом затрат на изменение критериев качества.

С использованием разработанной информационной технологии были решены более 150 прикладных задач [1, с. 219–222].

Решение комплекса задач по проектированию конструкций и технологий изготовления узлов летательных аппаратов из композиционных материалов, а также испытаниям узлов и агрегатов летательных аппаратов по заказам АНТК

им. О.К. Антонова, войсковой части г. Феодосия, НИИЭРАТ г. Люберцы, УкрНИИАТ г. Киев дало следующие результаты. Время испытаний сократилось на 30–80 %, материальные и энергетические затраты уменьшены на 20–70 %, снижение трудоемкости на 20–40 %, снижение себестоимости изготовления на 10–30 %, сокращение отказов в 1,5–5 раз, увеличение ресурса работы в 1,5–3 раза, снижение полетного веса агрегатов и узлов на 1–8 %. Экономический эффект составил 998,5 тыс. руб. [1, с. 219].

Примером существенного повышения точности при взвешивании на цифровых весах является разработка лаборатории экспериментально–статистических методов исследований: моделирование влияния “мешающих” факторов – температуры внешней среды и изменения напряжения автономного источника питания емкостного датчика весов. Первоначальная модель была принята линейной. Средняя относительная погрешность составляла 0,5 %. Учет в математической модели различных переменных систематических погрешностей позволил повысить точность измерений по критерию средней абсолютной погрешности в 13,3 раза и по критерию среднеквадратичной погрешности в 11,2 раза. Точность весов была повышена на несколько классов без стабилизации внешних условий [4].

Другая задача, решенная лабораторией экспериментально–статистических методов исследований – системный учет и комплексная оптимизация конструкторских факторов спиральных монолитных твердосплавных сверл (СМТС), технологии их изготовления, упрочнения, эксплуатации и восстановления (всего 20 факторов) дали возможность одновременно повысить ресурс работы сверла в 5–6 раз, производительность сверления печатных плат довести до 100–150 ходов/мин и гарантировать (100 %) на последующей операции металлизации стенок отверстий сплошной плотный мелкокристаллический слой химически осажденной меди без разрывов и царапин. Работоспособность СМТС была повышена до 32 погонных метра. При работе на станках с ЧПУ группой сверл необходимо уменьшить общую длину просверленных отверстий до 20–22 м [5].

Работа была внедрена на киевском производственном объединении им. С.П. Королева и в лаборатории твердосплавного инструмента налажен выпуск СМТС по усовершенствованной технологии.

Эта прикладная информационная технология проведения наукоёмких исследований успешно использовалась для решения широкого круга разнообразных задач более чем в 25 организациях стран СНГ с большим экономическим эффектом: в целом на один затраченный рубль было получено 2,82 руб. прибыли [3, 6].

Своим партнерам мы предлагаем.

- Поставку разработанных технологий, инструментов и оснастки для алмазно-абразивной обработки.
- Решение сложных исследовательских и диссертационных задач.
- Поставку программного обеспечения, которое поддерживает информационную технологию решения задач и не требует специальных знаний от пользователя.
- Обучение специалистов предприятий или организаций методам, которые

дають можливість ефективно вирішувати задачі вказаних класів.

- Лекції для студентів старших курсів, магістрів, аспірантів і преподавателей по вказанній вище тематикі.

Література: 1. Радченко С.Г. Математическе моделювання технологічних процесів в машинобудуванні. – К.: ЗАО «Укрспецмонтажпроект», 1998. – 274 с. 2. Радченко С.Г. Устойчивые методы оценивания статистических моделей: монография. – К.: ПП «Санспарель», 2005. – 504 с. 3. Лаборатория экспериментально-статистических методов исследований <http://www.n-t.org/sp/lesmi/> 4. Радченко С.Г., Бабич П.Н. Информационная коррекция переменных систематических погрешностей средств измерений и измерительных информационных систем // Радиоэлектроника и информатика. – 1999. – № 3(8). – С. 82–88. 5. Радченко С.Г. Моделирование и оптимизация конструкции и технологии изготовления спиральных монолитных сверл // Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем: сб. ст. в 2 т. / Донбас. гос. машиностроит. акад.; предс. редсовета Г.Л. Хаеа. – Краматорск: ДГМА, 1997. – Т. 1. – С. 50–58. 6. Радченко С.Г., Лапач С.Н. Высокая технология совершенствования выпускаемой продукции // Жизнь и компьютер: первый всесоюз. науч.-практ. семинар по автоматизации инж. труда, 19-25 нояб. 1990 г.: [материалы семинара]. – Харьков, 1990. – С. 183–188.

УДК 621.9:001.8

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НЕОБХІДНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИБІРКИ ДЛЯ ПОБУДОВИ РЕГРЕСІЙНОЇ МОДЕЛІ

Лапач С.М. (г. Київ, Україна)

The Paper investigates the problem of applying the idea theory design of experiments to matrix of passive experiments. The scientific idea and algorithms of forming subsamples from matrix of passive experiments and completing the construction of samples are described. The work results have been reduced to practice in R&D institute of aviation.

Теорія планування експерименту конструює матриці експериментів, які забезпечують побудову регресійних моделей з необхідними досліднику властивостями [1]. Разом з тим існує велика кількість задач, в яких застосування планування експерименту неможливе. Дослідник отримує вибірку пасивного експерименту з характеристиками, які не дають змогу побудувати регресійних моделей з задовільними характеристиками [2].

Проблема. Відсутність апарату формування вибірки з заданими властивостями для пасивного експерименту.

Мета. Застосування методології планування експерименту для випадку пасивного експерименту.

Наукова ідея. І D-оптимальність [1], і робастність [3,4], які покладені в основу найбільш ефективних планів експерименту, вимагають певної організації розміщення точок в факторному просторі. Для обох систем точки розміщуються рівномірно в факторному просторі, Тільки першому випадку вони утворюють регулярну, а в другому – випадкову просторову решітку. Пропонується з існуючої вибірки сформуванати підвибірку, точки якої будуть якомога більш рівномірно розміщені у факторному просторі. Точки мають бути рівномірно розподілені в факторному просторі. Простір має мати форму гіперкубу, або гіперкулі. Для цього необхідно видалити частину точок з вибірки, зберігаючи по

можливості загальні інтервали існування факторів. Видалені точки перейдуть до контрольної підвибірки. Якщо форма простору занадто відрізняється від ідеальних, то вибір неможливий і необхідні інші методи роботи: нова формалізація задачі або перетворення факторного простору, або додавання додаткових точок, які змінять форму факторного простору.

Необхідна передумова. Деформація вважається викликаною особливостями збору даних, а не функціональною залежністю між змінними, чи обмеженнями, які між ними існують. В такій ситуації намагання «виправити» наявну ситуацію стає по суті фальсифікацією експериментальних даних. Це видалення з даних інформативної частини.

Таблиця 1
Координати вершин для
трьохвимірного простору

Номер вершини	Координати
1	0,0,0
2	0,0,1
3	0,1,0
4	0,1,1
5	1,0,0
6	1,0,1
7	1,1,0
8	1,1,1

Визначення степені сформованості факторного простору. Ідеальний простір розглядається як одиничний гіперкуб, або гіперкуля, вписана в одиничний гіперкуб простору координати вершин можна записати як двійкові числа, які відповідають номеру вершини мінус 1. Наприклад, для трьохвимірного простору координатами вершин приведені в табл. 1.

Для визначення ступеню деформації гіперкубу необхідно визначити відстані між протилежними вершинами.

Кількість вершин гіперкубу визначається як $N_{\text{вершин}} = 2^m$. З табл. 1 легко побачити, що протилежні вершини це такі, для яких сума номерів дорівнює $N_{\text{вершин}} - 1$. Наприклад, перша і восьма, четверта і п'ята, тощо.

Ступінь реформованості визначається за наступним показником

$$Q_{\text{гіперкуб}} = \prod_{i=1}^K \frac{D_i}{D_{\text{діаг}}}$$

де K – кількість діагоналей, D_i – значення діагоналі в реальному факторному просторі, $D_{\text{діаг}}$ – теоретичне значення діагоналі. Кількість діагоналей $K = 2^{m-1}$, а відстань між протилежними вершинами для ідеального гіперкубу $D_{\text{діаг}} = \sqrt{m}$. Тут m – розмірність факторного простору. Для гіперкулі радіус, який використовується замість $D_{\text{діаг}} = 1$. Тоді значення показнику розраховується

$$Q_{\text{гіперкуля}} = \prod_{i=1}^K D_i \cdot \text{Може бути перераховане}$$

$$Q_{\text{гіперкуля}} = Q_{\text{гіперкуб}} \times \frac{1}{(\sqrt{m})^m} \cdot D_i - \text{довжини осей по різним векторам. При цьо-}$$

му критерій якості змінюється в інтервалі $0 \leq Q \leq 1$. Значення 1 відповідає ідеальному найкращому варіанту, коли множина точок в факторному просторі утворює гіперкуб чи гіперсферу. Значення близько 0 відповідає виродженому факторному простору, коли дві чи більше координатних осей майже паралельні.

Чим ближче значення Q до 1, тим ближче форма простору до ідеального. Початкові дані, які далекі від ідеальної форми, не можуть бути задовільним чином розбиті на навчальну та контрольну вибірку. Таким чином, можливо до початку обробки визначити можливість ефективного розбиття. В табл. 2 представлено зв'язок між коефіцієнтом реформованості і закорельованістю.

Таблиця 2

Співвідношення між показником реформованості і закорельованістю	
Коефіцієнт деформації для однієї осі (двовимірний випадок)	Коефіцієнт кореляції
0,25	>0,8
0,5	>0,45
0,75	>0,25

Для визначення граничного коефіцієнту для багатовимірного випадку необхідно вказане значення піднести до степеню, який дорівнює числу осей.

Алгоритм визначення деформованості простору:

1. Визначення координат теоретичної вершини за двійковим кодом.
2. Визначення координат реальної вершини. Для цього знаходиться точка з реальної вибірки, найближча до теоретичної.
3. Для протилежних вершин знаходиться відстань між реальними точками.
4. Обчислюється коефіцієнт деформованості як відношення реальної відстані до теоретичної для даної осі.
5. Якщо коефіцієнт менше критичного, то діагональ і реальні координати вершин для неї запам'ятовуються.
6. П.п. 1-5 виконуються для всіх теоретичних діагоналей гіперпростору.

В зв'язку з тим, що в багатофакторній вибірці число теоретичних діагоналей дуже велике, кожна з реальних точок біде використовуватись в кількох діагоналях.

Опис алгоритму формування підвибірки:

1. Знайти граничні точки $\{X_{zp}\} = \{\min X_i; \max X_i\} \forall i \in (1, m)$.
2. Нормувати факторний простір в одиничний гіперкуб $x'_{ij} = \frac{x_{ji} - \min x_i}{\max x_i - \min x_i}$.
3. Задати гіпотетичну складність залежності відгуку від конкретної змінної за допомогою степені апроксимуючого поліному по i -му фактору f_i .
4. Задати критичне значення коефіцієнту спотворення простору $Q_{кр}$.
5. Визначити необхідну кількість точок, виходячи з гіпотетичної складності залежності відгуку від конкретної змінної N_{min} і N_{max} (за [3]).
6. Розрахувати можливість ефективного розбиття на підвибірки.
7. Якщо розбиття неможливе – роботу припинити. Або перейти в п.3 для задання нових степенів і перерахунку кількості дослідів.

8. Знайти критичну відстань між точками. $d_{кр} = \sqrt{\sum_{i=1}^m A_{x_i}^2}$, де

$$\Delta_{x_i} = (x_{i_{max}} - x_{i_{min}}) / (f_i + 1).$$

9. Найдти матрицю відстаней між точками $d_{ij} = \sqrt{\sum_{l=1}^m (x_{il} - x_{jl})^2}$.

10. Взявши за основу точки, які утворюють вісь з найбільшою довжиною, залишити в навчальній вибірці тільки точки, відстань між якими більша граничної.

11. Якщо кількість дослідів менше необхідного, то додати до вибірки нові точки, які знаходяться якнайдалі, до вже включених. Визначаються за умовою $\sum_{i=1}^N |D_{max} - d_{ij}| \Rightarrow \min$. Тут d_{ij} – відстань між точками, D_{max} – максимальна довжина теоретичної діагоналі, i – номер уже вибраної точки, j – номер точки-кандидату, N – кількість вже вибраних точок.

По п.11 можна застосувати покроковий відбір. При додаванні кожної нової точки розраховуються статистичні і обчислювальні характеристики матриці, і приймається рішення про зупинку, продовження процесу включення нових точок або повернення на попередній крок.

В тих ситуаціях, коли можливо проведення додаткових експериментів пропонується алгоритм добудови точок для деформованого простору:

1. Вибирається діагональ з деформацією більше критичної.
2. Для даної діагоналі знаходяться координати теоретичних вершин.
3. Визначені в п. 2 вершини додаються до списку додаткових точок.
4. П.п.1-3 виконуються для всіх деформованих діагоналей.

Після додавання до вихідної матриці експериментів, визначених за вказаним алгоритмом, вибірка буде мати необхідні статистичні властивості.

Висновки. Представлено ефективні алгоритми формування підвибірки з пасивного експерименту і добудови пасивного експерименту для отримання заданих властивостей, відповідних вимогам робастності. Розроблено відповідні програмні модулі, які розширюють можливості програмних засобів [3, 5]. Результати роботи впроваджені в НДІ Авіації. Застосування запропонованих алгоритмів дозволило формувати з матриць пасивного експерименту навчальні матриці з задовільними властивостями (зменшення закорельованості від 0,7-0,9 до 0,3-0,4) для отримання регресійних моделей прогнозування показників апаратури.

Література: 1. Налимов В.В., Голикова Т.И. Логические основания планирования эксперимента. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: 1981. «Металлургия». – 152 с. 2. Лапач С.Н. Проблемы построения математических моделей экспериментально-статистическими методами // Прогресивна техніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва. Праці НТУУ “КПІ”. – Т. 2. – К.: НТУУ “КПІ”, 1998. – С.25-29. 3. Лапач С.Н., Чубенко А.В., Бабич П.Н. Статистические методы в медико-биологических исследованиях с использованием Excel. – 2 изд. перераб. и доп. – К.: Морион, 2001. – 408 с. 4. Радченко С.Г. Устойчивые методы оценивания статистических моделей. – К.: ПП «Саспарель». – 504 с. 5. Лапач С.Н., Радченко С.Г., Бабич П.Н. Планирование, регрессия и анализ моделей PRIAM (ПРИАМ) / Каталог программные продукты Украины. – К.: 1993. – С. 24-27.

**МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ СТАНДАРТИЗОВАНОЮ ПІДГОТОВКОЮ
ВИРОБНИЦТВА ШТАМПІВ ХЛШ**

**Клещов Г.М., Клещов М.Г., Череватенко І.О., Радулов Ю.О.,
Панченко С.А.** (м. Одеса, Україна)

A case standardized preproduction stamps frame is examined.

У зв'язку з відсутністю фахівців з наочної області (створенню штампів), змінився попит ринку від індивідуалізації виробничих процесів на підвищений інтерес до комп'ютерних систем, за допомогою яких можна забезпечувати серійне безпаперове, безлюдне і ефективне управління виробництвом. У наш час перехід до серійного виробництва і комп'ютерних технологій, дозволяє застосувати системний підхід, стандартизацію і уніфікацію зберігаючи гнучкі, багато номенклатурні методи обробки і забезпечуючи можливість часто перебудовувати виробництво, витрачаючи на це мінімум часу і засобів. У зв'язку з вказаним виникла необхідність в технічно гнучких механізмах, автоматизованих інформаційних системах і технологіях управління, які дозволяють підвищити продуктивність при серійному виробництві [1]. При створенні адаптивної моделі управління використан системний підхід, який дозволяє застосовувати модель у всіх галузях промисловості: важкої, легкої і в створенні побутової техніки.

Мета роботи – скорочення термінів і трудових витрат підготовки виробництва та виготовлення штампів холодної листової штамповки (ХЛШ).

Основні результати роботи. Як об'єкт дослідження нами прийнята структура адаптивної моделі інформаційного інтегрованого промислового комплексу (МІІПК) процесу управління механічним виробництвом при створенні систем по проектуванню і виготовленню штампів [2]: вирубних, суміщених і послідовної дії холодної листового штампування, а як предмет досліджень – математичний апарат і моделі ухвалення рішень. Для опису адаптивної моделі (див. рис.) використані алгоритми і методи теорії системного аналізу, а

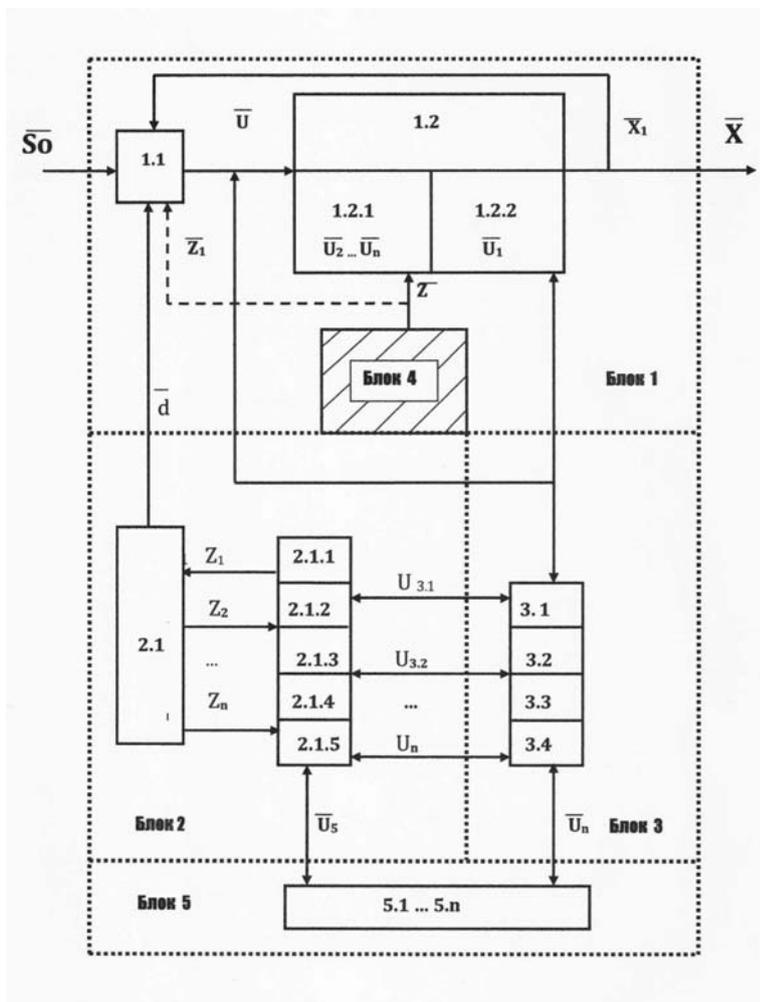


Рисунок. Модель управління підготовкою виробництва і виготовлення деталей штампів.

також синтез оптимізації організаційних структур. Дана модель базується на теоретико-множинному підході, в основі якого лежить представлення системи у вигляді сукупності безлічі елементів (блоків і векторів, що управляють). Модель складається з 5 блоків. Блок 1 – основний на вхід (вектор S_0) подаються усі параметри штампуємої деталі, вихідом є вектор X – деталі виготовленого штамп. Блок 1 складається з під блоку 1.1 – під управлінням, якого (вектор U) здійснює всю підготовку виробництва і виробничий (робочий) процес. У під блоці 1.2 – виробництва, що складається з 1.2.1- підготовки, і 1.2.2 - виробничого процесу проводяться операції під управлінням векторів $(u_1, u_2, u_3, u_4, \dots, u_n)$. Блок 3 - призначений для управління обробкою всією вхідною, поточною і вихідною інформацією. Блок 5 – під управлінням блоку 3 здійснює всю обробку на ПЕОМ. У блок 4 – поступають виробничі умови (БЗВУ), що змінюються, які передаються в під блок 1.2 (робочий орган) вектором z , а вектором z_1 у блок 1.1 передаються ті зміни, які можуть бути враховані без змін структури і програмного продукту.

У випадку, коли виробничі умови, що змінюються, не сприймаються (не враховуються) основним блоком (№1) вступає в працю блок №2 – адаптивний блок. У адаптивному блоці послідовно включаються в роботу наступні під блоки (2.1.1- 2.1.5). Під блок №2.1.1 – порівняння, розпізнавання і оцінювання, який використовуючи дані під блоку № 2.1.2 – нормативно - довідкової інформації (Гости, Ости, РТМ і т.д.), визначає можливість рівноправної заміни для інформації, що поступила (зміни: по хімічних властивостях матеріалу, по конфігурації, по товщині штампованого металу, по допусках і посадках і т.п.). Під блок № 2.1.3 – під блок знань – використовується роками накопичений досвід у вигляді формул, алгоритмів ухвалення рішень, програм і т.д. Під блок 2.1.4 – програмного поля сприйняття (ППС), перевіряючого можливість алгоритмів і програм блоку сприйняти поточні зміни, Під блок № 2.1.5 – алгоритмів адаптації, для яких потрібен час для складання нової структури або розробки нового рішення.

Після відробітку під блоків № 2.1.1 – № 2.1.5 ухвалене рішення передається під блоку №2.1 – « Вчитель» для остаточного ухвалення рішення. «Вчитель» – це фахівець з багатим досвідом роботи, перевібивши ухвалене рішення блоками № 2.1.1 – №2.1.5, ухвалює своє остаточне рішення і передає вектором d в під блок № 1.1 – під блок управління, який вектором U передає нове ухвалене рішення в робочий під блок №1.2.

Як наголошувалося раніше [2,3] штампи розглядаються як найбільш стандартизовані і уніфіковані вироби. Враховуючи викладене в автоматизованій моделі виробництва штампів застосований “змішаний”, гнучкий, багатоменклатурний спосіб виробництва. Концепція цього способу полягає в наступному. Весь виробничий процес розбивається на три стадії. Слід зазначити, що у виробничих умовах від величини партії оброблюваних деталей залежать година і вартість їх обробки: чим більша партія, тим менша вартість обробки однієї деталі, оскільки підготувально-завершальна година ділиться на всю кількість деталей в партії, а робітник, настроївшись на партію, не перебудовується в течії, наприклад, зміни або декількох змін. Таким чином, основна година обробки

партії деталей наближається до машинного часу роботи устаткування. Така організація виробництва відповідає серійному або крупносерійному виробництву.

У той же час замовнику-виробнику одиничного (дрібно-серійного) виробництва штампів необхідно штамп в одному – двох і рідко у трьох екземплярах (дублерів). Тому розглядається придбаний автором досвід створення спеціалізованих виробництв по виготовленню штампів, де «Портфель замовлень» комплектується, з урахуванням вимог замовників, по галузевих типорозмірам штампів, тобто штучно переходячи від одиничного виробництва до серійного - це перша стадія. У цьому випадку конкретна конфігурація штампованої деталі не береться до уваги, а береться описувана навколо штампованої деталі фігура: трикутник, прямокутник, коло, трапеція і т.д. У цьому випадку кількість замовлень по типорозмірам можна довести до десятків і сотень одиниць.

На другій стадії створюється серійне виробництво (цех, ділянка) по виготовленню створених укрупнених типорозмірів деталей, тобто виготовлення штамп-заготовок або штамп-напівфабрикатів (блоків, пакетів) згідно існуючих стандартів.

На третій стадії створюється одиничне виробництво (цех, ділянка), який допрацьовує пакет (робочі частини кожної деталі пакету окремо) - інструмент у штамп - заготовках для кожної конкретної штампуючої деталі (перехід до одиничного виробництва), а блок до індивідуального штампу береться з раніше виготовлених типорозмірів штамп – заготовок. Така організація значно, в десятки - сотні разів, скорочує терміни виготовлення деталей штампів. Модель організації виробництва штампів (у рівній мірі може бути застосована і для інших виробництв: у верстатобудуванні, в авіабудівництві, в гнучких автоматизованих лініях і т. д.).

Розглянута концепція інтелектуальної інтегрованої адаптивної системи підготовки виробництва і гнучкого автоматизованого змішаного виробництва штампів (від переходу одиничного до серійного, а потім знову до одиничного виробництва), дозволила, при промисловому впровадженні, скоротити терміни випуску одного (експериментального) штампу до 1(одної) доби, замість традиційним «ручним» методом до декількох років (у партії).

Використання вказаної адаптивної моделі і штамп - заготовок при проектуванні і виготовленні вказаних видів штампів і локальних складових систем, дозволило провести випробування комплексної (інтегрованої) системи: у Одеському заводі штампів НВО «Спецтехоснастка» і Чебаксарському заводі промислових тракторів. Промислове випробування показало, що спроектувати і виготовити штамп в металі, при використанні штамп - заготовок, можливо за одну добу замість традиційних двох – трьох років при неавтоматизованому способі (вручну: проектування розкрою листа; проектування деталей і загального виду ще не існуючого штампу; видача, за рік раніше, замовлених відомостей на матеріали і комплектуючих для виготовлення деталей штампу; проектування технологічних карт на кожну деталь спроектованого штампу; проміжні затвердження у себе і узгодження із замовником кожного виду розроблених технологічних карт; проміжна видача (розробка) конструкторсько-технологічної документації: калік, синяк і т.д.). Безумовно, у кожному випадку використовують:

стандартизацію штампового оснащення; уніфікацію - використання блоків, пакетів і деталей штампів для різних типорозмірів штампів і як висновок - застосовується високоточна вимірювальна техніка контролю, оскільки штампи є особливо точним інструментальним оснащенням.

Адаптивна модель використовується в інтегрованому промисловому комплексі, в системах підготовки виробництва і виготовлення виробів: САПШ в системі автоматизації конструкторсько-технологічного проектування штампів, АСТПП – в автоматизованій системі технологічної підготовки виробництва, ГАСП – в гнучких автоматизованих системах виробництва [4].

Висновки. Використання фрагментів архітектури МІІПК дозволило розробити і впровадити на підприємствах країн СНД і України десятки локальних і інтегрованих систем по: оптимальному розкрою, конструкторсько-технологічному проектуванню і підготовці програм, що управляють, для виготовлення штампів в металі на виробництві. Одержаний значний економічний ефект не тільки від впровадження підсистем і комплексу в цілому, але і від проектування і виготовлення на них в металі більше 1000 штампів. По сукупності вимог що пред'являється до систем, з урахуванням наявного досвіду по стандартизації, уніфікації і при впровадженні на виробництві і багаторічного використання адаптивної моделі в учбовому процесі, доцільно, надалі, розвивати наявний досвід.

Література: 1. Гужва В. М. Інформаційні системи і технології на підприємствах. – К.: Київський Національний Економічний Університет, 2001. 2. Gennadiy Kleshchev. Integrated industrial information complex of economic systems control for farming industry // Зб. праць міжнародної науково-технічної конференції. MOTROL' 2006, том 8А, Люблін, Польща, 2006, с 158-167. 3. Клещев Г.М. Роль стандартизації в підготовці виробництва штампів послідовної дії холодного листового штампування в сільгоспвиробництві // Аграрний вісник причорномор'я: Зб. наук. праць. Випуск 40. – Одеса: Одеський державний аграрний університет, 2007. – С. 136 – 143. 4. Клещев Г.М. Адаптивна система автоматизованого проектування штампів. Серія 6. “Технологія Тракторного і сільськогосподарського машиностроєння”. Експрес-інформація. – М.: 1982. – С. 5-17.

УДК 621.512.011.56.01.67

РОЛЬ МЕТРОЛОГІЇ, СТАНДАРТИЗАЦІЇ ТА УНІФІКАЦІЇ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ШТАМПІВ ХЛШ

Клещев Г.М., Возна Т.М., Крицкій О.О., Богун В.Д., Любимов А.Я.
(м. Одеса, Україна)

Consider the feasibility and importance of metrology, standardization and unification of the design of stamps.

Холодна листовка штамповка (ХЛШ) – є одним з найбільш передових методів по виготовленню різноманітних виробів. Завдяки методу холодного листового штампування на виробництві досягається точність, швидкість і дешевизна виробів [1]. Цей метод знайшов широке застосування в різних галузях промисловості. Однак термін проектування та виготовлення саміх штампів та трудові затрати дуже багаті.

Аналіз основних досліджень та публікацій. Розглянуті останні публікації

і в них дослідження носять демонстраційний характер [5] з відносним наближенням до реального виробничого проектування і виготовлення штампів ХЛШ.

Основні результати дослідження. Пропонується нова технологія побудови штампів. При цьому «Портфель» замовлень формується за типорозмірами (10, 50, ..., 100 штук деталей у партії). Ці партії деталей штамп-заготовок (напівфабрикатів) плануються повністю для виготовлення кожному робітнику. В цьому випадку підготовительно – заключний час, котрий для окремої деталі може бути більш основного (машинного) часу для деталі в партії буде мінімальним. Крім того, пропонується початково окремо виготовляти штамп-заготовки (напівфабрикати): блоки за типорозмірами та заготовки пакетів в ці блоки, які не прив'язані до конкретної деталі. Ці комплекти штамп-напівфабрикатів зберігаються окремо до тих пор, поки не будуть доробляться пакети для конкретних деталей

Доробка пакетів у відповідний блок здійснюється за допомогою комплексної (інтегрованої) системи автоматизованої підготовки виробництва та виготовлення деталей штампів (наскрізна автоматизація): від одноразового кодування конкретної деталі що штампується – підсистем «Розкрою» - «Конструктор» – «Технолог» – «Оператор» – «Креслення» – «Друк» до видачі управляючих програм (УП) для верстатів з ЧПУ [2,4]. Інформація від системи до системи передається диспетчером ПЄОМ – системою керування базами даних і знань (СКБДЗ).

Основою автоматизованої системи підготовки виробництва є: типові велико уніфіковані конструкції холодно штампової оснастки (напівфабрикати), застосування цехових ПЄОМ, які керують верстатами з ЧПУ та сучасні математичні методи і засоби обчислювальної техніки.

В теперішній час одним з основних напрямків удосконалення управління при виробництві штампів є впровадження інформації, яка дозволяє підняти якість процесів обробки, зберігання та передачі інформації від системи до системи.

Як відомо метрологія, стандартизація та уніфікація використовуються в усіх галузях при виробництві штампів з метою досягнення оптимального виробу. Останнім часом часто виникає проблема збору, обробки та візуалізації вимірювальних процесів. Як правило, для цієї мети широко використовуються спеціалізовані мікроконтролери чи комп'ютери, які зв'язані з вимірювальними перетворювачами. Використання сучасного програмного комплексу для автоматизації виготовлення деталей штампів дозволяє значно скоротити час, полегшити розробку. Точні вимірювання мають бути не тільки обов'язковою умовою промислового виробництва високої якості, але і доступними.

Зразком широкої стандартизації та уніфікації в країнах СНГ, зокрема в Україні, можуть служити штампи та штампове оснащення холодно листової штамповки. Такі галузі промисловості, як приладобудування, радіотехніка, електротехніка та інші є найбільшими споживачами виробів, які отримані холодним листовим штампуванням. Від тривалості проектування та виготовлення залежать терміни підготовки виробу, а це складає значну частину собівартості штампувальних виробів [3].

Таким чином, використання штамп – напівфабрикатів, інформаційних технологій та сучасних вимірювальних комплексів дає можливість автоматизувати процес штампування та скоротити час виготовлення виробу, що приводить до мінімізації затрат на виробництво.

Висновки. Впровадження штамп – напівфабрикатів і інформаційних технологій дозволяють підняти якість та скоротити терміни підготовки виробу в галузях промисловості, таких як приладобудування, радіотехніка, електротехніка та інші, які є найбільшими споживачами виробів, які отримані холодним листовим штампуванням. Нова технологія дала можливість:

- значно скоротити трудомісткість виробництва штампів за рахунок комплектування штампів по типорозмірам таким чином на багато збільшувати партії виробляемих деталей штампів;
- значно скоротити трудомісткість виробництва штампів за рахунок окремого виготовлення штамп – напівфабрикатів;
- значно скоротити термін виробництва штампів за рахунок обробки формують деталей (матриць, пуансон – матриць, пуансонів) і сполучених деталей (виштовхувачів, знімачів) на верстатах з ЧПУ.

Література: 1. Шпрыгин В.И., Котликов Я.Ш. Резервы и стимулы повышения эффективности производства. – М.: 1985. 2. Грибачевский А.Г., Прохваткин Н.В. Моделирование и автоматизация конструирования штампов. – Минск: Наука и техника, 1986. 3. Клещев Г.М. Стандартизация и унификация основные факторы ускоренного изготовления штамповой оснастки // Труды 13-й Международной научно-технической конференции «Физические и компьютерные технологии». – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2007. 4. Клещев Г.М. Автоматизована система управління виробництвом штампів ХЛШ. Вісник одеської державної академії будівництва та архітектури. – Випуск № 32, Зовнішнєрекламсервіс. – Одеса, 2008. 5. Квасников В. П., Клещёв Г. М. Роль стандартизации в подготовки производства штампов совмещённого действия ХЛШ // Вісник інженерної академії України. – 2008. – №1. – С. 168-174.

УДК 621.922.04

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ МЕТОДАМИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ГАЗОВЫХ БАЛЛОНОВ

Иванов Е.И., канд. техн. наук (г. Мариуполь, Украина)

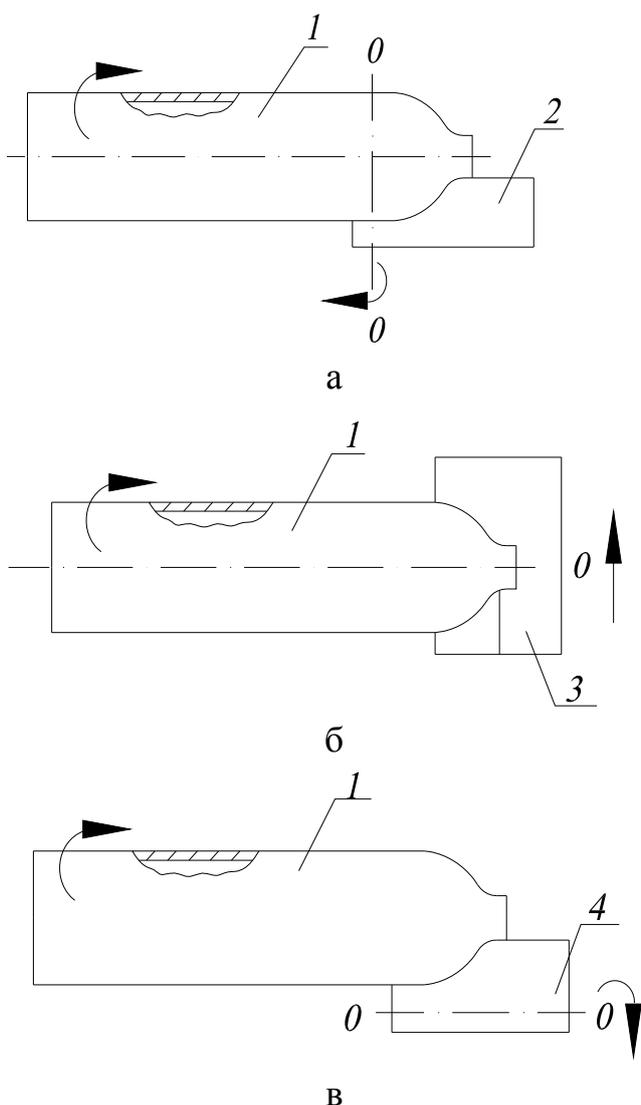
Considered advanced processing technology of metals with plastic deformation method used for the manufacture of gas cylinders.

В настоящее время для нужд различных отраслей производства и сфер обслуживания производится большой ассортимент различных баллонов: автомобильные - применяемые в автомобильной промышленности, бытовые - для бытовых нужд населения, углекислотные - применяемые в пищевой промышленности, кислородные - применяемые в медицине, а также для сварки и резки металла, баллоны-огнетушители, которые применяются для пожаротушения. Наибольшую долю в общем производстве баллонов занимают автомобильные баллоны [1,2]. В странах СНГ они выпускаются в ОАО “Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича” и Уральском металлургическом заводе. Причем, производственных мощностей ОАО “Мариупольский металлургиче-

ский комбинат им. Ильича” достаточно для производства автомобильных баллонов для нужд Украины и стран СНГ. Цель работы – анализ прогрессивных технологий обработки металлов методами пластического деформирования [3,4], используемых для производства баллонов.

Эффективным способом получения баллонов из трубчатых заготовок является обкатка инструментом трения, когда усилие передается к деформируемому металлу в процессе скольжения металла относительно инструмента. Обкатка инструментом трения выгодно отличается от обкатки роликами тем, что весь процесс деформации вплоть до смыкания стенок заготовки осуществляется за один проход инструмента. Для обкатки инструментом трения можно применять различные кинематические схемы взаимодействия заготовки и инструмента, обеспечивающие при его соответствующей калибровке управляемое постепенное перемещение очага деформации по окружности и вдоль образующей заготовки.

В качестве примера на рис. 1 представлены три варианта взаимодействия трубчатой заготовки с инструментом трения. Все эти варианты реализованы в отдельных конструкциях эксплуатируемых обкатных машин. Обкатку (рис. 1,а)



применяют в производстве бесшовных газовых баллонов: трубчатой заготовке 1 с нагретым до ковочной температуры концом создают вращение вокруг своей продольной оси 0–0, одновременно инструменту 2 – поворот на 90° вокруг оси, перпендикулярной к оси заготовки. Создаваемое локальное давление инструмента на металл обеспечивает деформацию заготовки до заданного инструментом профиля. Деформация происходит в процессе трения – скольжения между инструментом и заготовкой.

Обжатие (рис. 1,б) легко осуществляется на станках токарной группы и состоит в следующем: трубчатой заготовке, конец которой нагрет до ковочной температуры, сообщают вращательное движение вокруг своей оси. Одновременно инструменту 3 сообщают поступательное перемещение в направлении, перпендикулярном к оси вращения заготовки, благодаря чему заготовка деформируется до заданной формы. Этот метод при-

Рис. 1. Схема обкатки трубчатых заготовок.

меним в мелкосерийном и единичном производстве такой продукции как баллончики для заправки зажигалок газом, для сифонов или корпусов огнетушителей.

Обкатка по схеме, показанной на рис. 1, в, осуществляется поворотом инструмента 4 на 360° относительно оси 0–0, параллельно оси вращающейся заготовки. Каждая из рассмотренных возможных кинематических схем процесса обкатки имеет свои особенности, которые учитываются при разработке технологических процессов и проектировании оборудования.

Существуют также нетрадиционные прогрессивные методы обкатки баллонов и других изделий из труб, обкатка с использованием электроконтактного нагрева и т.д.

Электроконтактный нагрев при обработке металлов давлением, включая обжим и обкатку плоских и трубчатых заготовок, имеет следующие преимущества по сравнению с другими способами нагрева: высокую скорость, вследствие чего уменьшаются окисление и обезуглероживание поверхностей изделий; высокий КПД (до 80-90 %); возможность создания компактных автоматов и автоматических линий; возможность полного или частичного совмещения по времени с обработкой давлением; возможность уменьшения площадей, занимаемых оборудованием; постоянная готовность к производству; не нужны разогрев, пусковой режим и т.д.; возможность осуществления при неподвижной заготовке и вращающемся инструменте и при вращающейся заготовке. Этот метод нашел применение в промышленности ряда стран.

Широко используют схему токоподвода к заготовке через два скользящих контакта (патент США, кл. 219-149 № 2309561) или от трех полюсов вторичной обмотки трехфазного трансформатора обкатного инструмента (патент Англии кл. 88) 4) Н, №938351). В этом случае электроконтактный нагрев совмещают с обкаткой.

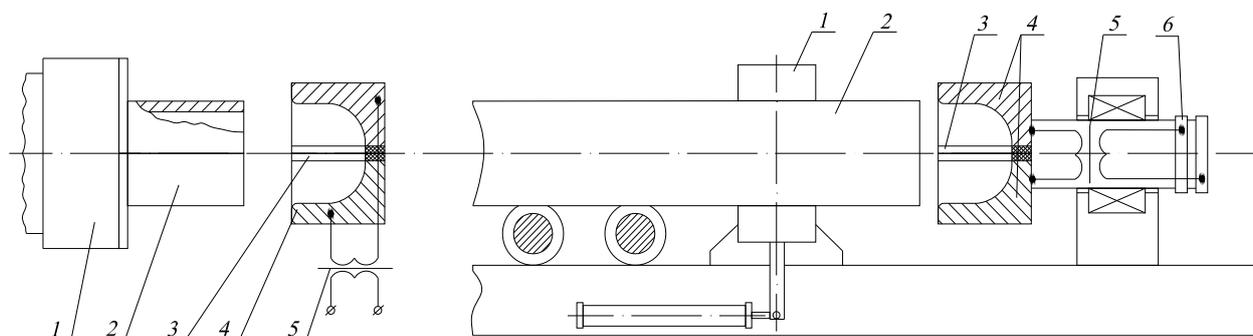


Рис. 2. Схема обжима с электроконтактным нагревом.

На рис. 2 представлена схема установки для обжима с токопроводом через скользящие контакты 6. Она состоит из стальной матрицы 4, разделенной на две части электроизолятором 3 и подключенной ко вторичному витку трансформатора 5. Заготовке 2, закрепленной в шпинделе станка с патроном 1, сообщают вращательное движение, а матрице - поступательное перемещение вдоль оси вращения заготовки (вести-процесс, патенты США № 2309561, 2 325 564, 2 335 165).

Заготовка, входя в контакт с двумя половинками матриц, замыкает их,

вследствие чего вдоль образующей заготовки против полосы электроизолятора матрицы выделяется теплота. При вращении заготовки равномерно нагревается обкатываемый конец, а при перемещении матрицы - происходит одновременная пластическая деформация вплоть до сварки стыкуемых кромок. В Чехии находится в эксплуатации установка для изготовления бесшовных газовых баллонов, работающая по описанной схеме.

Для деформации концов длинных труб, которые невозможно или нерационально вращать при обкатке, существует схема обкатки по принципу "невращающаяся заготовка - вращающийся инструмент" (рис. 2), в которой совмещены обжим с электроконтактным нагревом. Вращающаяся обжимная головка (с жестко закрепленным на ней трансформатором броневого типа) при осевом заталкивании невращающейся заготовки обеспечивает обжим ее конца.

Смена полуматриц 1 связана с отсоединением токоподводящих. Для этого в шпинделе предусмотрены два окна А. Трансформатор 6 питается через кольца со скользящими контактами 6 (рис. 2). Технологические особенности деформации концов труб путем совмещения обжима с электроконтактным нагревом связаны с большой скоростью нагрева заготовки и с изоляцией поверхностей нагрева от активного воздействия атмосферных газов. На установках, работающих по описанной схеме, можно обжимать концы труб из материалов, активно поглощающих газы: титана, ниобия, сплавов на их основе и др. После обработки таких материалов давлением, связанным с нагревом в среде атмосферного воздуха, их поверхностный слой удаляют обработкой резанием.

Опыты Кирицева А.Д. по обжиму труб из сплавов на основе титана показали, что температура нагрева заготовок может быть ниже, чем при других способах деформации. Снижение температуры и времени нагрева, а также некоторая изоляция поверхности обжимаемого конца заготовки от окружающей среды значительно уменьшают и окисление ее поверхности. В качестве оборудования для изготовления осесимметричных деталей из трубчатых заготовок в зависимости от масштаба производства и его номенклатуры применяют: специальные машины узкого назначения с той или иной степенью механизации, универсальные машины, рассчитанные на изготовление деталей широкой номенклатуры, приспособления к металлорежущим станкам и многошпиндельные автоматы роторного типа.

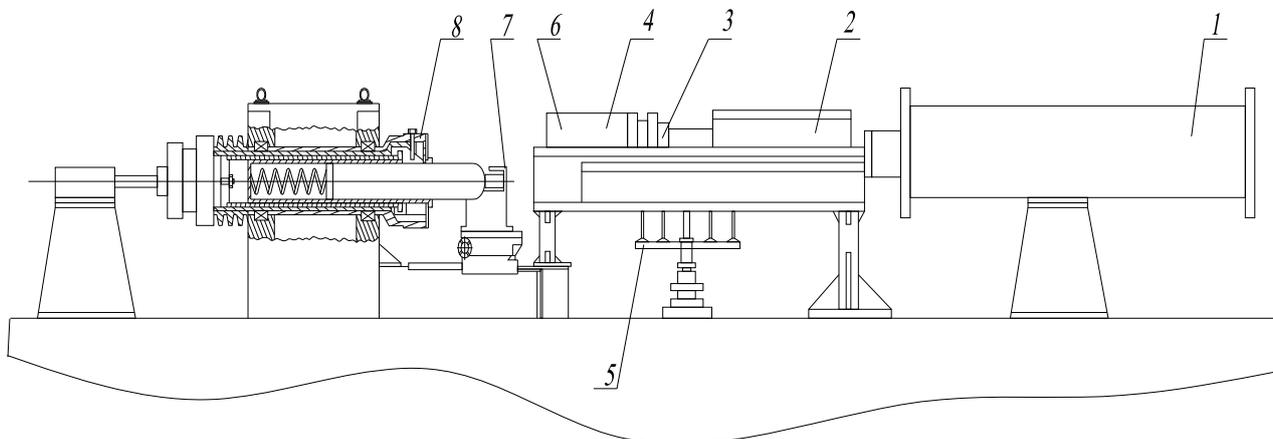


Рис. 3. Обкатная машина с разгрузочно-загрузочным механизмом.

На рис. 3 приведена обкатная машина с механизмами задачи и выдачи заготовки в шпиндель и из шпинделя, работающая в баллоном цехе ОАО “Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича” и предназначенная для массового производства баллонов.

Работа обкатной машины заключается в следующем. Пневматическим цилиндром 1 через ползун 2 в тарелку 3 заготовка 4 заталкивается в полый шпиндель. Тарелка 3 свободно вращается вокруг своей оси, ее вылет из ползуна регулируется с помощью винта или прокладок. Заготовка при заталкивании в шпиндель упирается в пружину, смонтированную в полости шпинделя, которая сжимает её до тех пор, пока ползун 2 не достигнет упорного кольца, расположенного на поворотном суппорте. Далее, когда пружина внутри шпинделя сжата, заготовка зажимается самоцентрирующим кулачковым патроном, а заталкиватель отводится. Кулачки патрона удерживают заготовку от выбрасывания пружиной на протяжении всего процесса обкатки.

Пятикулачковый самоцентрирующий патрон приводится во вращение от гидравлического цилиндра, являющегося продолжением шпинделя. Энергоноситель (вода под давлением 100 кгс/см^2 и одной или другой полости цилиндра подводится с помощью коробки распределения через две трубки, находящиеся одна в другой (по внутренней трубке - в одну полость, между внутренней и наружной - в другую). После того как заготовка зажата, а заталкиватель отведен в исходное положение, включается привод шпинделя, а затем поворотный суппорт, на котором закреплен формующий инструмент.

При вращении заготовки в одновременном перемещении формующего инструмента происходит деформация (обката) нагретого конца заготовки.

После окончания обкатки и возвращения поворотного суппорта в исходное положение разводятся кулачки патрона к пружине, разжимаясь, выталкивает заготовку из шпинделя на роликовую дорожку 6, откуда пневматическим выбрасывателем 5 заготовка сбрасывается на стеллаж. Описанная машина хорошо себя зарекомендовала в эксплуатации.

Для обкатки днищ и горловин на трубчатых заготовках размером до $325 \times 32 \text{ мм}$ и длиной до 3200 мм в ОАО “Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича” спроектирована и эксплуатируется обкатная машина с приводом мощностью 160 кВт, работающая аналогично описанной выше схеме. Обратные машины описанной конструкции применяются для обкатки днищ и горловин баллонов из сталей 38ХА, 40ХНМА и могут быть применены для обкатки концов днищ и горловин иной конфигурации.

Некоторое переоборудование поворотного суппорта и механизма подачи заготовки в шпиндель позволяет расширить технологические возможности обкатных машин - раскатывать концы труб на оправе перед обкаткой изделия; причем раскатку и обкатку удаётся выполнить с одного нагрева и с одной установки заготовки.

На рис. 4 изображено приспособление к обкатной машине, показанной на рис. 3, позволяющее совместить раскатку конца трубы на оправке с ее обкаткой без оправки.

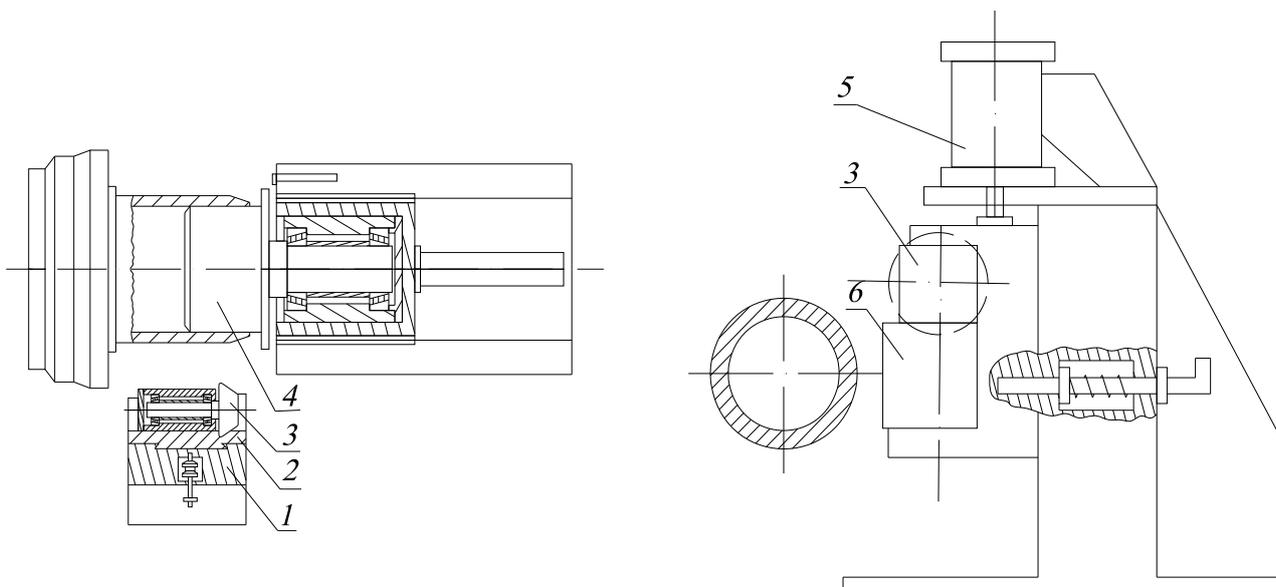


Рис. 4. Приспособление к обкатной машине, позволяющее совместить обкатку с предварительной раскаткой конца заготовки на оправке.

Для этого на поворотном суппорте 1 обкатной машины смонтирован суппорт смены инструмента 2 с пневмоприводом 5, на котором жестко закреплен фасонный раскатной ролик 3 и инструменты трения 6, а не механизм заталкивателя вместо тарелки 3 на (рис. 4) смонтирована свободно вращающаяся оправка 4. Работа описываемой обкатной машины заключается в следующем. При подаче в шпиндель оправка 4 входит внутрь заготовки и остается в ней в течение всего периода, раскатки. Далее с помощью суппорта смены инструмента 2 фасонный раскатной ролик 3 устанавливается в рабочее положение и поворотному суппорту сообщается движение - поворот на заданный угол, благодаря чему осуществляется раскатка. Затем поворотный суппорт возвращается в исходное положение, в рабочее положение перемещается инструмент трения 6, одновременно отводится в исходное положение ползун толкателя с оправкой. Далее осуществляется процесс обкатки.

Известны технологии обкатки трубчатых заготовок путём тангенциальной подачи специально калиброванного инструмента. Созданы машины, предназначенные для получения на трубчатых заготовках различной формы пережимов, днищ, горловин, которые позволяют совмещать операции обкатки, с операциями механической обработки, сварки, калибровки. Обкатная машина для тангенциальной обкатки трубчатых заготовок (рис. 5) состоит из приводного шпинделя 1 с самоцентрирующим патроном 3, станины 2, суппорта 5 с гидроприводов, двух опорных винтов 6, блока инструмента 7.

Для обработки заготовка 4 с нагретым концом задается в шпиндель машины, зажимается кулачками патрона 3 и приводится во вращение. Одновременно включается гидропривод подачи суппорта 5 с блоком инструментов 7, благодаря чему осуществляется обкатка, и другие операции совмещаете с обкаткой. Винты 6 служат упорами, ограничивающими ход суппорта 'вперёд-назад'. Их регулировка дает возможность заканчивать процесс обкатки на заданном участке инструмента, что позволяет по мере его выработки переходить

на "свежие" участки, а также обкатывать различные типы изделий на разных участках одного инструмента.

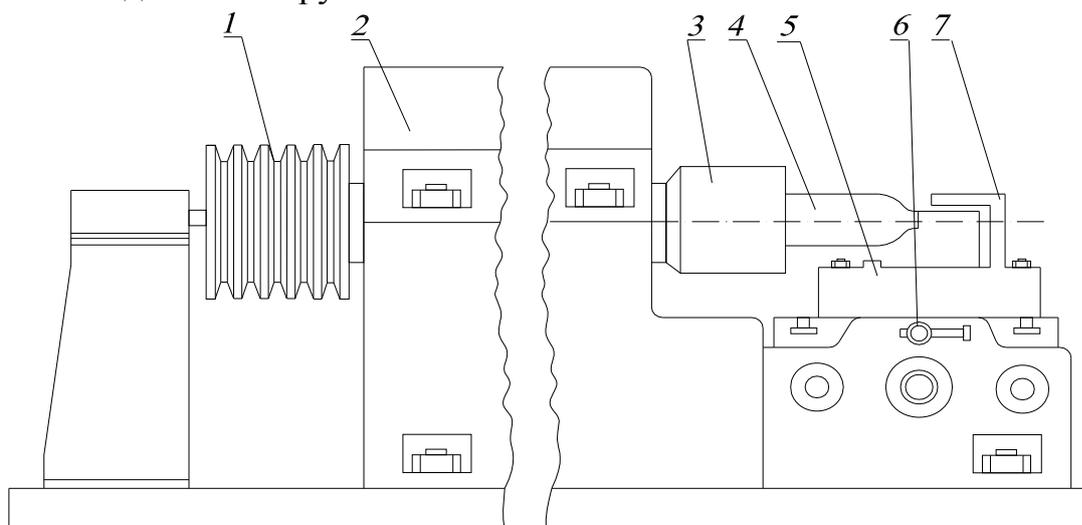


Рис. 5. Машина для тангенциальной обкатки трубчатых заготовок.

Для совмещения пластической деформации конца трубы с отрезкой обкатанной части путем снятия стружки, например для получения колпачков со сферическими днищами непосредственно из трубы, гидропривод управляется гидрокопирами, задающими скоростную программу перемещения суппорта, которая имеет четыре характерных участка: I - соответствует заданной скорости перемещения суппорта при обкатке; 2 - подводу резца к трубе; 3 - врезанию и отрезке заготовки; 4 - возврату инструмента в исходное положение.

Существуют аналогичные обкатные машины и с механическим приводом. Тогда скорость перемещения суппорта задается программным барабаном, на котором фрезеруется паз для копирного ролика, перемещающего суппорт. Такая обкатная машина, изготовлена СКМЗ для Мариупольского металлургического комбината им. Ильича.

Для изготовления осесимметричных изделий из трубчатых заготовок по способу тангенциальной обкатки могут быть легко переоборудованы соответствующие металлорежущие станки, имеющие вращающийся шпиндель и поперечный суппорт. Легче других для тангенциальной обкатки и для совмещения с ней ряда других технологических операций могут быть использованы токарные станки. При этом формующий инструмент и отрезной резец с резцедержателем устанавливают на поперечном суппорте станка так, чтобы резание начиналось сразу же по окончании обкатки. Чтобы предотвратить пробуксовку заготовки в кулачках патрона и ее смятие, на кулачках закрепляются наделки, увеличивающие контактную площадь. Лучше всего станок оборудовать цанговым зажимным патроном с пневмоприводом. Форма обкатного инструмента принимается в зависимости от формы заданного изделия.

Комплексная механизация и автоматизация многих технологических процессов, в том числе обработки металлов давлением, осуществляется на автоматических роторных линиях, разработанных и изученных Кошкиным Л.Н., Петрокасом Л.В., Клузовым И.А., Исером Б.Н. и другими учеными. Созданию

автоматических роторных линий по производству изделия из трубчатых заготовок предшествует разработка схемы и технологии обкатки на роторе и проектирование рабочего ротора, обеспечивающего качественное выполнение технологических операций.

На рис. 6 показан многошпиндельный автомат роторного типа для обкатки днищ и горловин на концах трубчатых заготовок. Автомат состоит из станины 2, узла крепления инструмента 6, установленного рядом со станиной, передней и задней опор 3 и 11, загрузочного 5 и шпиндельного 8 барабанов, жестко закрепленных на валу 13 ротора, привода 1 ротора, привода шпинделей (шкив и зубчатая передача 12). К опоре 3 прикреплен конус 4 с программой работы загрузочных механизмов 7. К опоре 11 прикреплен копир 10 с программой работы зажимных кулачков шпиндельных узлов 9. Загрузочный и шпиндельный барабаны 5 и 8 смонтированы так, что оси загрузочных механизмов 7 совпадают с осями шпиндельных узлов 9. Узел 6 предусматривает возможность быстрой смены подготовленных инструментов поворотного барабана с инструментом в новое фиксированное положение. Автомат работает при непрерывном вращении ротора и шпинделей. Порядок работы механизмов автомата следующий. Трубчатая заготовка с нагретым под обточку концом через дозатор попадает на желоб одного из загрузочных механизмов 7. При дальнейшем вращении ротора конусный ролик загрузочного механизма находит копир 4, благодаря чему заготовка задается в шпиндель. После зажима заготовки цанговым патроном шпинделя, программа, заданная копиром 10, конусный ролик возвращается в исходное положение.

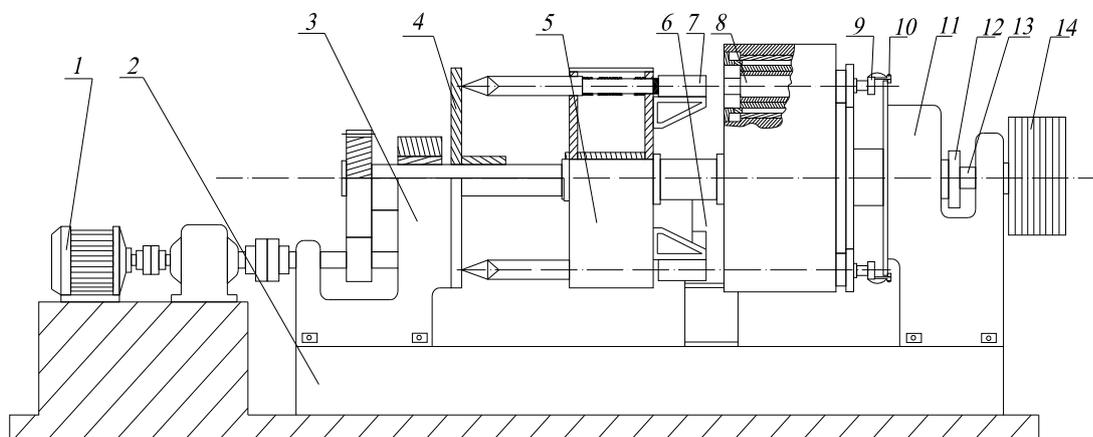


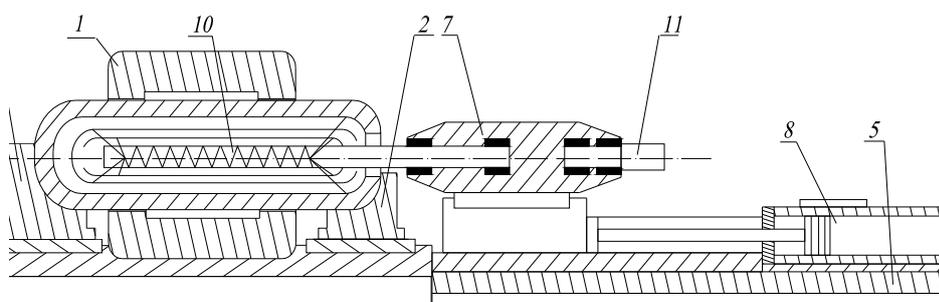
Рис. 6. Многошпиндельный автомат роторного типа для обработки концов трубчатых заготовок.

Загрузка следующей ячейки ротора осуществляется аналогично. Заготовка, закреплённая в шпинделе и вращающаяся вместе с ним, при дальнейшем движении по окружности ротора подходит к неподвижно закреплённому инструменту (узел 6), обкатывается об него, после чего разжимаются цанги зажимного патрона шпинделя и пружина шпинделя (на рисунке не показана), сжатая при заталкивании заготовки в шпиндель, выбрасывает заготовку на приемный желоб. В процессе обкатки возможно совмещение операций сварки, обрезки нагорячо, отрезки со снятием стружки и других по аналогии с тангенциальной обкаткой.

По классификации Кошкина Л.В., описанная обкатная машина относится к машинам 2-го класса, в которых обработка осуществляется в процессе непрерывного транспортирования заготовки через зону инструмента. Заметим, что для роторной обкатки трубчатых заготовок могут быть использованы многошпиндельные автоматы соответствующей мощности, предназначенные для обработки металлов резанием. Представляет практический интерес опыт обкатки концов труб сближающимися роликами. Конструкция такой машины разработана и испытана Первоуральским новотрубным заводом. Машина предназначена для обкатки горловин баллонов и может быть применена для обкатки других подобных изделий

План расположения оборудования и технологический поток участка для обкатки трубчатых заготовок во многом зависит от выбранного способа нагрева заготовок. Концы заготовок перед обкаткой можно нагревать в щелевых и очковых кузнечных печах с мазутным и газовым отоплением, с помощью индукторов ТВЧ, электроконтактным нагревом, ацетиленокислородным пламенем с помощью одно и многосопловых горелок.

А-А повернуто



А-А повернуто

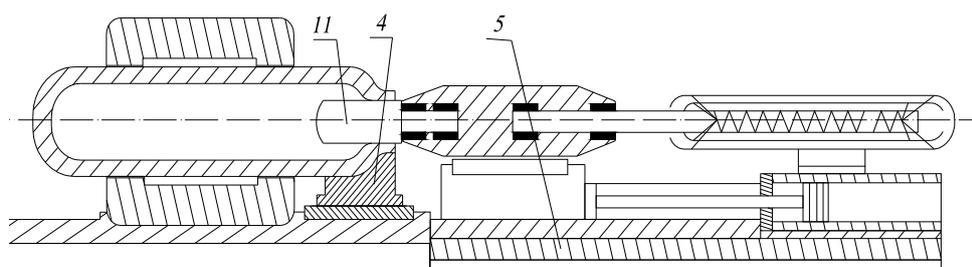


Рис. 7. Схема установки.

В массовом производстве бесшовных газовых баллонов из труб диаметром 219 мм и больше в качестве нагревательных устройств применяют главным образом щелевые печи, отапливаемые природным газом. Преимущества такого способа нагрева перед другими заключаются в следующем: в использовании самого дешевого вида топлива - газа; в возможности нагревать в одной печи заготовки разных диаметров, толщин стенок, марок сталей, конфигураций; разнотолщинность заготовок, допустимая техническими условиями на труба, не сказывается на перепаде температуры нагрева стенок; в возможности повторного нагрева частично обкатанных заготовок, что позволяет исправлять передельный брак производства; в возможности механизации и автоматизации процесса

нагрева и транспортировки заготовок через печи к обкатной машине.

Известны приспособления, позволяющие приблизить заготовку баллона к готовому изделию. Например, существует установка (АС № 914152), позволяющая при одновременном закатывании дна и горловины получить отверстие в горловине изделия, рис. 7. Установка работает следующим образом. После нагревания заготовки до требуемой температуры ее помещают в шпиндель обкатной машины 1. После зажима заготовки в шпинделе механизма 1 упор 2 отводят в сторону, а стол 5 устройства с размещенными на нём секциями транспортёра 6, поворотной головкой 7 и приводом 8, перемещают с помощью привода 9 до совмещения оси поворотной головки 7 с осью заготовки.

Затем с помощью привода 8 поворотную головку, с закрепленными на ней оправками, смещают по направляющим вдоль оси заготовки, осуществляют введение внутрь заготовки оправки 10, которая содержит упругие элементы, например, набор пружинных пластин по типу рессор, обеспечивающих подпор стенки заготовки изнутри, включаются формующие инструменты 3 и 4. После обжатия днища и частично горловины баллона инструменты 3 и 4 отводят, а оправку 10 извлекают из баллона и поворотную головку при помощи привода 8 возвращают в исходное положение. Затем головку поворачивают вокруг своей вертикальной оси на 160° и с помощью привода 8 оправку 11 вводят в горловину баллона и включают в обкатку формующий инструмент 4 (рис. 7,б). После окончания обкатки горловины баллона инструмент 4 отводят, поворотную головку 7 с помощью привода 8 тоже смещают от механизма 1, оправку 11 извлекают из горловины баллона. Стол 5 устройства с размещенным на нем транспортёром 6, головкой 7 и приводом 8 перемещают с помощью привода поперек оси обкатной машины до совмещения с ней оси трансформатора. Происходит разжим баллона в шпинделе обкатной машины и выталкивание его последующей заготовкой на транспортер 6 для транспортировки.

Литература: 1. Иванов И.Е. Технологическое обеспечение точности и стабильности изготовления резьбовых отверстий в баллонах в условиях массового производства: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / И.Е. Иванов. – Мариуполь, 2008. – 20 с. 2. Иванов И.Е. Иванов Е.И. Разработка алгоритма анализа точности технологических процессов // Тезисы докладов XI региональной научно-технической конференции Приазовского государственного технического университета. – Мариуполь: ПГТУ, 2004. – С. 147-148. 3. Капорович В.Г. Производство деталей из труб обкаткой. – М.: Машиностроение, 1978. – 136 с. 4. Смирнов В.С. Теория прокатки. – М.: Металлургия, 1967. – 460 с.

УДК 621.378

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА

Ефименко Н.Г., канд. техн. наук, **Дощечкина И.В.**, канд. техн. наук,
Татаркина И.С. (г. Харьков, Украина)

A welding material for blade of reentrant cutter instead of rapid steel R6M5 has been developed.

Состояние вопроса. Улучшение качества средств производства и выпуск их в требуемом количестве является ключевым вопросом технологии машиностроения и ремонта техники. Эти задачи решаются, прежде всего, путем повы-

шения технологического уровня инструментального производства. Затраты на оснащение и обеспечение инструментом в себестоимости продукции очень велики, что объясняется не столько высокой стоимостью, сколько небольшим сроком эксплуатации инструмента в связи с быстрой изнашиваемостью.

Срок службы инструмента непосредственно определяет стоимость изделий. Очень важно знать, сколько комплектов инструмента и какое число промежуточных переточек необходимо для получения той или иной детали. С увеличением стойкости инструмента экономится значительный объем высоколегированных сталей, снижаются производственные и трудовые затраты. Современные инструментальные материалы являются высоколегированными, получают по достаточно сложной технологии и отличаются высокой стоимостью. В связи с этим рационально и экономически целесообразно изготавливать из них только режущие части инструмента.

Производительным и эффективным способом создания составного инструмента, в котором рабочую часть изготавливают из быстрорежущей стали или твердого сплава, а нерабочую – из конструкционной стали, является электродуговая наплавка.

Цель работы и постановка задачи. Наплавка использована как наиболее универсальный метод восстановления изношенных рабочих поверхностей инструмента с целью улучшения качества и снижения его стоимости.

Задачей данной работы явились разработка и исследование новых наплавочных материалов для рабочей части резцов, которые обладают повышенной износостойкостью, теплостойкостью и достаточной прочностью.

Результаты исследований. Для наплавки авторами разработан экономнолегированный плавящийся электрод, которому присвоена марка ЭНИР-2. Электрод состоит из стального стержня (проволока Св08А) с рутил-фтористокальциевым покрытием, в состав которого входят легирующие компоненты. Отличительной чертой указанных электродов является их дешевизна, так как основная группа легирующих элементов (W, V, Ti, Co), вводимых в покрытие, бралась из отходов в виде порошков твердых сплавов марок Т30К4, Т15К6, ВК8. В качестве раскислителей применяли ферромарганей и ферротитан.

Для повышения износостойкости и теплостойкости, а также обеспечения высоких технологических свойств наплавленного металла в состав покрытия вносили (расчетное количество) 0,3-0,9 % Y_2O_3 . Обладая малым потенциалом ионизации, редкоземельные металлы (РЗМ) способствуют улучшению стабильности горения дуги. Кроме того, имея большое сродство к вредным примесям (S, P, N и др.) РЗМ способствуют очищению металла от них, переводя легкоплавкие эвтектики в тугоплавкие комплексы.

По данным [1] под влиянием иттрия изменяется механизм кристаллизации, снижается макро- и микрохимическая неоднородность металла, образовавшиеся сложные неметаллические включения равномерно распределяются в матрице сплава. Границы зерен становятся чище.

Все перечисленные эффекты положительно сказываются на прочностных и пластических характеристиках наплавленного металла и на его способности сохранять твердость при повышенных температурах. Электродами ЭНИР-2 бы-

ла произведена наплавка режущей части проходных отогнутых резцов на державки из стали 45. Наплавку производили электродами диаметром 3 мм, постоянным током обратной полярности. После наплавки резцы медленно охлаждались для получения качественного наплавленного металла. Следует отметить хорошие сварочно-технологические свойства электрода: малое разбрызгивание металла, высокая устойчивость дуги, хорошее формирование валика. Химический состав наплавленного металла приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав наплавленного металла

Концентрация элементов, %								
C	Cr	W	V	Co	Mo	Ti	B	Y _{расч}
1,0-1,1	1,5-2,0	5,5-6,3	1,0-1,1	0,5-0,7	3,4-4,0	0,08-0,1	0,05-0,06	0,07

Микроструктура наплавленного металла представляет собой мартенсит с большим количеством дисперсных карбидов, участки эвтектики, содержащей Σ W+Mo и остаточный аустенит в количестве ~ 7%. Рентгенографическим анализом установлено наличие карбидов Fe₃W₃C, Cr₃C, TiC, W₂C, VC, Mo₂C. Наличие Ti, V, W, Mo и легирование иттрием способствовали получению мелкого зерна в наплавке. Твердость наплавленного металла равна 59-61 HRC.

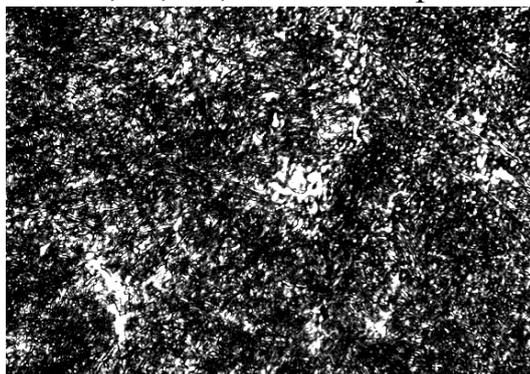


Рис. 1.1 Микроструктура наплавленного металла после термической обработки, X 500.

Наплавленные резцы подвергались термической обработке. Так как наплавленный металл по химическому составу близок высоколегированным сталям типа быстрорежущих, то и термическая обработка резцов с наплавкой проводилась по схеме, принятой для таких сталей. Производили закалку в масле от температуры 1225°C. Нагрев под закалку осуществлялся в хлорбариевой ванне. Выдержка при температуре закалки составляла 20 мин. После закалки проводили трехкратный отпуск при температуре 560°C (выдержка - 1 час при данной температуре) с охлаждением на воздухе. После термической обработки микроструктура наплавленного металла представляет собой мелкоигльчатый мартенсит, большое количество мелких карбидов, ориентированных по сетке, и остаточный аустенит (до 10%) (рис. 1.1). Твердость наплавки 64-66 HRC.

Термообработанные резцы затачивались вручную, а затем на универсально-заточном станке в специальном приспособлении для обеспечения точности геометрии. Определение режущих свойств опытных резцов производилось с использованием метода торцевой обточкой. При исследовании режущих материалов, таких как быстрорежущие стали, и подобных им сплавов метод торцевой обточкой обеспечивает достаточную точность результатов. Расхождение в величинах, полученных методом торцевой обточкой и продольного точения, не превышает 10%, а средняя величина абсолютных ошибок – 4%. В нашем эксперименте ставилась цель получить сравнительные характеристики практически

одинаковых по свойствам инструментальных материалов (наплавки, имеющей химический состав близкий к стали Р6М5, и гостированной стали Р6М5), а в подобных случаях вероятность получения достоверных данных при использовании метода торцового точения резко возрастает [2]. Сущность метода торцовой обточки заключается в использовании ускоренных комплексных испытаний для нахождения величины скорости резания при определенных оборотах и получения зависимости между скоростью резания и стойкостью резцов с наплавкой.

Исследования проводились на токарно-винтовом станке. Точная величина оборотов шпинделя определялась с помощью тахометра непосредственно при точении. Критерием притупления резца считалось разрушение испытуемой вершины с полной потерей режущих свойств. После каждого прохода торец протачиваемого образца подрезался твердосплавным резцом. Все наплавленные резцы испытывались по двум режущим вершинам при одинаковых режимах: $n = 150$ об/мин; $S = 0,1$ мм/об; $t = 1$ мм. Несмотря на то, что при резании двумя вершинами геометрия имеет существенные отличия, полученные результаты совпадают достаточно хорошо и объясняется это тем, что при превалирующем тепловом износе более значительное влияние оказывают условия теплоотвода, а принятая геометрия заточки обеспечивает идентичность этих условий.

Выводы. Результаты экспериментов показали, что стойкость наплавленного металла ($V_{60} = 45$ м/мин) соответствует уровню стойкости стали Р6М5 ($V_{60} = 46$ м/мин). Стойкость резцов из стали 45 с наплавкой режущей части электродом ЭНИР-2 не уступает резцам, с режущей частью из стали Р6М5, а стойкость наплавленных резцов значительно ниже за счет экономного легирования дорогими карбидообразующими элементами, взятыми из отходов производства.

Наплавку можно многократно использовать для восстановления резцов взамен нового дорогого инструмента из быстрорежущей стали, что очень важно в наше время экономических трудностей и сокращения производства.

Литература: 1. Влияние иттрия на температурный интервал кристаллизации углеродистой стали / Ефименко Н.Г., Стеренбоген Ю.А., Дофшенко Л.К., Васильев В.Г. // Автоматическая сварка. - № 10. - 1990. - С. 45-47. 2. Фельдштейн Э.И. Методы определения обрабатываемости металлов. - Л.: Машгиз, 1953. - 186 с.

УДК 621.91

ПИТАННЯ ЗМІНИ РОЗМІРУ ОТВОРІВ АРМОВАННИХ КОМПОЗИТИВ ПІСЛЯ ОБРОБКИ

Хавін Г.Л., канд. техн. наук, Яковенко М.О. (м. Харків, Україна)

The effect of dimension fluctuation (shrinkage) of bore for reinforced composite materials is considered. The physical analysis of shrinkage occurrence and its dependence from different factors is carried out. Using experimental data to draw a conclusion about shrinkage appearances and calculations it is impossible now.

При свердленні композиційних склопластиків має місце відоме явище зменшення діаметру отвору. По даним різних дослідників величина цього зменшення (усадки) може коливатися в межах 0,1 – 0,15 мм. До того ж треба відзначити, що стосовно до практично усіх типів композиційних матеріалів

конкретних рекомендацій по розрахункам величини усадки від геометричних параметрів інструменту, його загострення, значень швидкості і подачі немає. В літературі є численні експериментальні дослідження, що обмежуються рамками досліджених матеріалів (наприклад, намотаних склопластиків), які узагальнити на інші класи волокнистих композитів неможливо.

На теперішній час які-небудь систематичні дослідження по визначенню величини усадки отворів при свердленні композиційних волокнистих матеріалів відсутні. Більш того, відсутні достатньо вірогідні емпіричні і теоретичні залежності по розрахункам величини усадки, і, таким чином, питання про вплив геометрії інструменту, режимів різання, специфіки загострення та зношування інструменту залишаються відкритими. Фактично, по-перше, треба визначити питання, що більш впливає на діаметр утворених отворів – биття шпинделя верстата і свердла, або саме фізичне явище усадки.

Проведені експериментальні дослідження [1-3] показали, що говорити про різницю заданого і фактичного діаметра при обробці більшості композитів і пластмас можна тільки при чистової обробці отворів або для операцій протягування і розверчення. При цьому при розгляданні фактора усадки треба відрізняти погрішності розміру отворів одразу після обробки і після деякого періоду часу. Не менш важливим фактором, що впливає на якість обробки, має однорідність та відсутність дефектів заготовки, як у напрямку свердлення отвору, так і у перпендикулярних напрямках (значно впливає на розшарування та розлохмачення поверхні отвору).

Аналізуючи інформацію про зміну діаметру отворів при свердленні склопластиків [1,3,4], у тому разі через сутки після обробки, були зроблені наступні висновки:

- точність отворів 4-5 класу;
- діаметр обробленого у склопластику отвору, як правило, більше діаметру свердла, за рахунок биття шпинделя верстату і свердла;
- для більшості склопластиків через сутки діаметр отворів зменшується;
- із збільшенням зносу свердла величина усадки при обробці отворів в цих матеріалах трохи зменшується;
- найбільше відхилення розмірів отворів при обробці одним свердлом за одну установку має місце для пресованих матеріалів;
- величина зміни діаметрів отворів після обробки практично не залежить від геометрії свердла;
- швидкість різання також мало впливає на величину усадки;
- при обробці практично усіх типів композиційних пластиків зміна подачі у діапазоні, що розглядається, визиває зміну величини усадки не більш ніж 0,01 мм, що дає змогу говорити про незначний вплив подачі на усадку;
- головний вплив на усадку (розбивання) оказують особливості структури матеріалу, що обробляється, його фізичні властивості та наявність дефектів структури.

По цим даним явище пружної післядії суттєво змінюється від зразка до зразка, і найбільшим чином залежить від випадкових дефектів у зразку, голов-

ним чином від кількості і величини макродефектів. До макродефектів композиційного матеріалу відносять наявність тріщин у в'язучому (епоксидній смолі та т.п.) і зсув окремих шарів. Зсув шарів приводить до збільшенню плівки смоли у місці зсуву, внаслідок чого має місце нерівномірність товщини матеріалу. Зсув також приводить до появи тріщин у шарі в'язучого або повітряних пустот.

У феноменологічній постановці вплив макродефектів на характеристики міцності армованих пластиків достатньо повно викладено у роботах [5-7]. У цих роботах показано, що повітря залишається між і над шарами при ущільненні після укладки матеріалу (рис.1).

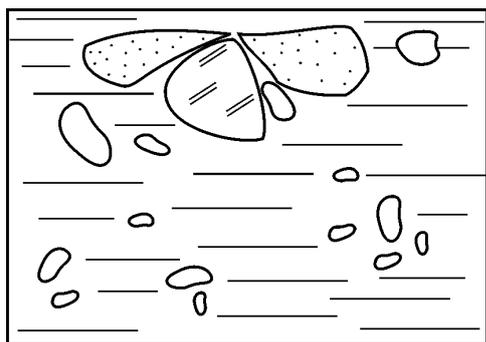


Рис. 1. Повітряні включення у армованих композиційних пластиках біля поверхні армованого пластику.

Якщо порівняти середньостатистичний розмір дефектів з величинами усадки або розбиття отворів (від 10 до 30 мкм [1]), то ці розміри практично однакові. До того ж наперед не можна уявити себе як наявність дефектів буде впливати усадку або розбиття отворів.

Треба відмітити, що, наприклад, для пресованого матеріалу АГ-4 при контролі отворів зроблених на двох партіях, для однієї партії отвори мають переважно усадку (біля 30 мкм). Для другої партії на багатьох отворах можна було бачити явище збільшення діаметру отвору після обробки, причому для 50% отворів діаметр не змінюється і має постійні розміри.

По даним роботи [2] середня величина усадки отворів у склопластиках складає: СТЕФ – 20 ÷ 50 мкм; АГ-4С – 10 ÷ 30 мкм; СВАН – 20 ÷ 40 мкм. По даним американських вчених, при свердленні реактопластів та склопластиків раціональна точність, з економічної точки зору, складає: для отворів до 5 мм - ± 0,1 мм, діаметром 5 – 10 мм - ± 0,15 мм і для діаметрів 10 мм і більше - ± 0,2 мм. Одержання більш точних отворів потребує застосування кондукторів, зменшення биття свердла (не більше 0,05 мм) або впровадження операції розгортання або зенкування.

Окремим чином треба розглядати процес усадки отворів при свердленні глибоких отворів (4–5 діаметрів свердла). Цей процес відрізняється фізикою процесу руйнування, що обумовлено особливостями властивостей волокнистих композитів, специфікою утворення стружки, особливостями контакту інстру-

менту і матеріалу. Ця операція виконується алмазним інструментом або твердо-сплавним шнековим свердлом. Літературні дані по вимірюванню значень усадки або розбиття отворів при глибинному свердленні армованих композиційних матеріалів відсутні.

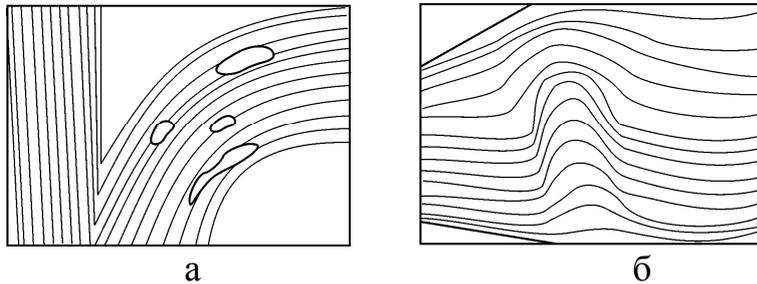


Рис. 2. Повітряні включення у армованих композиційних пластиках: а – повітряні включення у місцях різкої зміни геометрії; б – звивання шарів з повітряним включенням.

Наявність пустот або тріщин при механічній обробці свердлуванням взаємодіють з інструментом і можуть або розвантажувати напружений стан отворів або навпаки, посилювати його. При цьому найбільш імовірним є інтенсифікація процесу росту тріщин і не тільки між шарами,

але і у глибину матеріалу. Так, як відмічено у [8], у смолі композиту волосяні тріщини з'являються вже при контрольно-доводочних операціях.

Головний вивід з розглядання цього питання полягає у такому. На даному етапі досліджень кількісне підрахувати або прогнозувати усадку або розбиття отворів при свердленні (протягуванні, розверченні) не уявляється можливим. Враховуючи, що ця величина менш ніж відхилення у розмірах отворів за рахунок биття шпинделя верстата і інструмента, то для армованих композиційних матеріалів її можна не враховувати.

Роботу виконано за проектом М2307, що фінансується Міністерством освіти та науки України.

Література: 1. Буловский П.И., Петрова Н.А. Механическая обработка стеклопластиков. – Л.: Машиностроение, 1969. – 152 с. 2. Тихомиров Р.А., Николаев В.И. Механическая обработка пластмасс. – Л.: Машиностроение, 1975. – 206 с. 3. Кузнецов В.Д. Физика твердого тела. – Т.IV. – Томск: Полиграфиздат, 1947. – 465 с. 4. Руднев А.В., Королев А.А. Обработка резанием стеклопластиков. – М.: Машиностроение, 1969. – 119 с. 5. Смирнов В.И., Мещеряков В.В. Испытание и контроль судостроительных стеклопластиков. – Л.: Судостроение, 1965. – 187 с. 6. Розен Б. // В кн.: Волокнистые композиционные материалы. – М.: Мир, 1967. – С. 54-96. 7. Тарнопольский Ю.М., Скудра А.М. Конструкционная прочность и деформативность стеклопластиков. – Рига: Зинатне, 1966. – 280 с. 8. Росато Д.В., Грове К.С. Намотка стеклонитью. – М.: Машиностроение, 1969. – 310с.

УДК 621.923

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПЕРАЦИЙ ШЛИФОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ УМЕНЬШЕНИЯ ТЕПЛОПРЯЖЕННОСТИ ПРОЦЕССА

Кленов О.С. (г. Харьков, Украина)

Justifiable conditions improved operational efficiency grinding of products from hard-based materials to reduce heat-process.

Как показывает практика, основным ограничением повышения качества и производительности обработки на операциях шлифования изделий из труднообрабатываемых материалов является температурный фактор. Образующиеся при шлифовании прижоги, микротрещины и другие температурные дефекты

снижают качество обработки и требуют уменьшения режимов резания и применения более “мягких” шлифовальных кругов, что приводит к повышению трудоемкости обработки. В особой мере это относится к изделиям из твердых сплавов, высокопрочных сталей и наплавов и других материалов повышенной твердости. Поэтому вопросам снижения температуры шлифования постоянно уделяется большое внимание [1–3]. Для этого разработаны конкретные практические рекомендации, позволяющие исключить температурные дефекты обработки. Вместе с тем, данные вопросы в полном объеме не решены, существуют неиспользованные резервы шлифования, что требует проведения дальнейших исследований. Цель работы – обоснование условий повышения качества и производительности обработки изделий из труднообрабатываемых материалов на основе оптимизации структуры и параметров операций шлифования по температурному критерию.

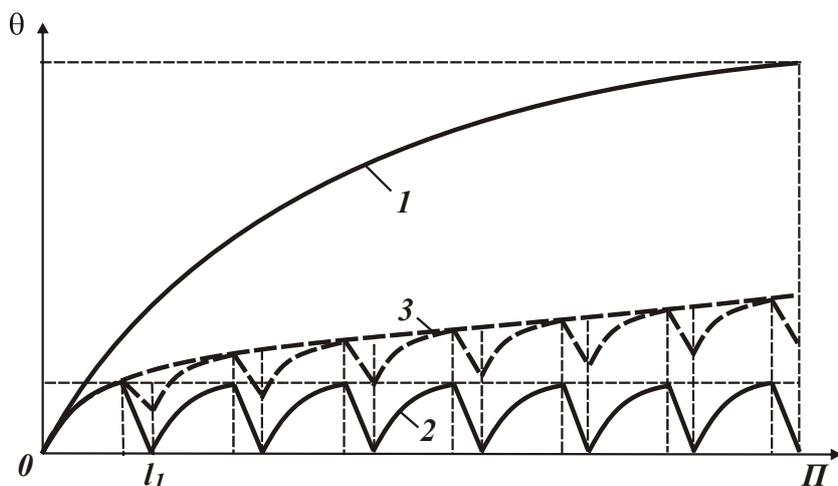


Рис. 1. Зависимость температуры шлифования θ от величины снимаемого припуска Π при обработке в один переход и отсутствии остывания обрабатываемого образца (1) и при обработке в n переходов при полном (2) и частичном (3) остывании образца.

температурному критерию.

Для решения поставленной задачи воспользуемся упрощенной зависимостью для определения температуры шлифования [4]:

$$\theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V_{рез} \cdot l_1}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}, \quad (1)$$

где σ – условное напряжение резания, Н/м²; c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К); λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала,

Вт/м·К; ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; $V_{рез}$ – скорость радиальной подачи при шлифовании прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга, м/с; l_1 – величина снимаемого припуска, м.

Основными условиями уменьшения θ является уменьшение параметров σ и l_1 . При съеме заданного припуска $\Pi > l_1$ уменьшение параметра l_1 связано с периодическим прерыванием процесса шлифования на время, достаточное для остывания обрабатываемого образца, и осуществлением обработки в несколько переходов. Уменьшение параметра l_1 , исходя из зависимости (1), допускает увеличение скорости $V_{рез}$ (при заданной температуре шлифования θ) и соответственно производительности обработки. Поэтому важно оценить основное время обработки операции шлифования и обосновать пути его уменьшения с учетом ограничения по температуре шлифования на основе оптимизации структуры и параметров операции шлифования для различных условий нагрева и охлаждения обрабатываемого образца.

На рис. 1 приведены обобщенные зависимости температуры шлифования θ от величины снимаемого припуска Π при обработке в один переход и отсутствии остывания обрабатываемого образца, а также при обработке в n переходов при полном и частичном остывании образца. Как видно, при обработке в n переходов температура шлифования θ меньше.

В связи с этим оценим основное время обработки τ при шлифовании в n переходов прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с постоянной скоростью $V_{рез}$ на каждом переходе:

$$\tau = \frac{\Pi_1}{V_{рез1}} + \frac{\Pi_2}{V_{рез2}} + \dots + \frac{\Pi_n}{V_{резn}}, \quad (2)$$

где Π_1, \dots, Π_n – припуски, удаляемые на каждом переходе ($\Pi_1 + \dots + \Pi_n = \Pi$), м; Π – суммарный снимаемый припуск, м; $V_{рез1}, \dots, V_{резn}$ – скорости радиальной подачи на каждом переходе, м/с.

Рассматривая в зависимости (1) в качестве параметра $V_{рез}$ параметр $V_{резn}$, а вместо параметра l_1 параметр Π_n , разрешим зависимость (1) относительно $V_{резn}$ и полученное выражение подставим в зависимость (2):

$$\tau = \frac{\left[\Pi_1^2 + \Pi_2^2 + \dots + \Pi_{n-1}^2 + (\Pi - \Pi_1 - \Pi_2 - \dots - \Pi_{n-1})^2 \right]}{A}, \quad (3)$$

где $A = \left(\frac{c \cdot \rho \cdot \lambda}{2} \right) \cdot \left(\frac{\theta}{\sigma} \right)^2$.

Очевидно, входящие в зависимость (3) переменные $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-1}$ неоднозначно влияют на основное время обработки τ . Подчиняя функцию τ необходимому условию экстремума от переменных $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-1}$, т.е. дифференцируя функцию τ по переменным $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-1}$, получено систему $(n-1)$ линейных уравнений с $(n-1)$ неизвестными:

$$\begin{aligned} \Pi_1 - (\Pi - \Pi_1 - \dots - \Pi_{n-1}) &= 0; \\ \Pi_2 - (\Pi - \Pi_1 - \dots - \Pi_{n-1}) &= 0; \\ \dots & \\ \Pi_{n-1} - (\Pi - \Pi_1 - \dots - \Pi_{n-1}) &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Определяя разности каждого последующего и предыдущего уравнений, получены следующие решения: $\Pi_2 = \Pi_1$; $\Pi_3 = \Pi_2$; \dots ; $\Pi_{n-1} = \Pi_{n-2}$, откуда $\Pi_1 = \Pi_2 = \dots = \Pi_{n-1}$. Тогда, с учетом того, что $\Pi_n = \Pi - \Pi_1 - \dots - \Pi_{n-1}$ первое уравнение системы (4) примет вид: $\Pi_1 - \Pi_n = 0$ или $\Pi_n = \Pi_1$, т.е.

$$\Pi_1 = \Pi_2 = \dots = \Pi_n = \frac{\Pi}{n}. \quad (5)$$

Таким образом доказано, что величины снимаемого припуска на каждом из n переходов одинаковы. Подставляя соотношения (5) в зависимость (3), определим минимальное основное время обработки:

$$\tau_{min} = \frac{\Pi^2}{n \cdot A}. \quad (6)$$

Из зависимости (6), видно, что при шлифовании в n переходов можно практически в n раз уменьшить основное время обработки по сравнению с шлифованием в один переход, рис. 2,а. Скорости $V_{рез}$ на каждом из n переходов будут равны между собой и определяются зависимостью

$$V_{рез} = \frac{n \cdot A}{\Pi}. \quad (7)$$

По сравнению с шлифованием в один переход скорость $V_{рез}$ увеличивается в n раз, рис. 2,б. Таким образом получено аналитическое решение задачи оптимизации структуры и параметров операций шлифования по критерию основного времени обработки с учетом ограничения по температуре шлифования. Основным условием осуществления данного решения является полное остывание обрабатываемого образца в период между переходами, т.е. в начале каждого последующего перехода температура образца должна равняться нулю. Выполнить данное условие можно при использовании традиционных схем плоского и круглого (наружного и внутреннего) шлифования, разбивая снимаемый припуск по проходам. Причем, с уменьшением припуска, удаляемого на каждом проходе круга, основное время обработки будет уменьшаться в соответствии с зависимостью (6).

Необходимо отметить, что данное решение можно получить, непосредственно анализируя зависимость (1). Очевидно, с уменьшением величины l_1 (рассматривая ее равной величине снимаемого на каждом переходе припуска) при заданной температуре шлифования θ увеличивается скорость $V_{рез}$, а это ведет к уменьшению основного времени обработки $\tau = l_1 / V_{рез}$.

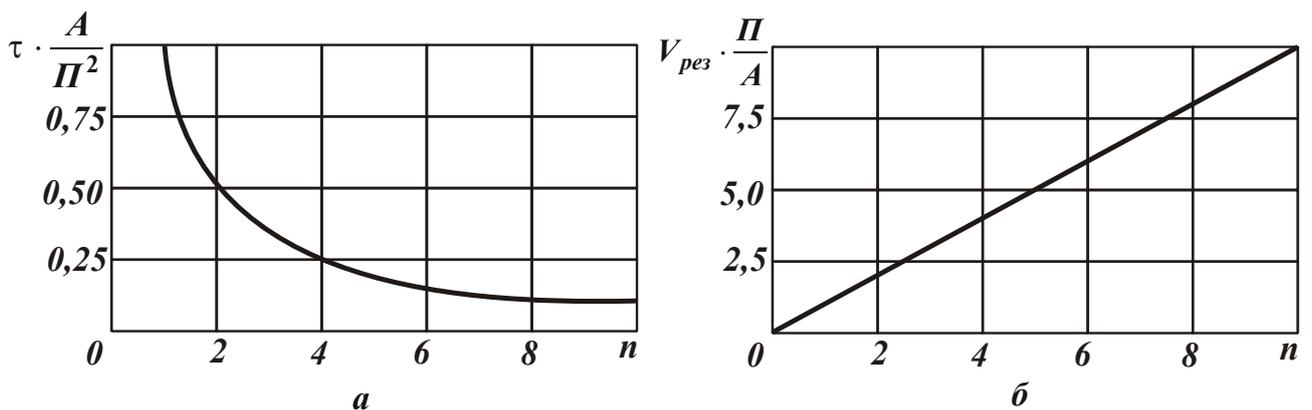


Рис. 2. Зависимости основного времени обработки $\tau \cdot A / \Pi^2$ (а) и скорости $V_{рез} \cdot \Pi / A$ (б) от количества переходов n .

Определим наименьшее основное время обработки с учетом времени полного остывания обрабатываемого образца между переходами. Как показано выше, чтобы реализовать оптимальный цикл шлифования (рис. 1, кривая 2) необходимо обеспечить полное остывание обрабатываемого образца между переходами. В связи с этим определим время полного остывания образца, считая,

что количество тепла $Q_{нагр}$, затраченного на нагревание образца до температуры θ , описывается

$$Q_{нагр} = S \cdot \lambda \cdot \frac{\theta}{l_2} \cdot \tau_{нагр} = S \cdot \theta \cdot \sqrt{0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \tau_{нагр}}, \quad (8)$$

где $l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \tau_{нагр}}$; $\tau_{нагр}$ – время нагрева образца, с.

Данное количество тепла должно равняться количеству тепла $Q_{охл}$, выделенному из нагретого образца на этапе его охлаждения (при отсутствии съема металла) [1]:

$$Q_{охл} = q_{охл} \cdot S \cdot \tau_{охл} = \alpha \cdot (\theta - \theta_0) \cdot S \cdot \tau_{охл}, \quad (9)$$

где $q_{охл} = \alpha \cdot (\theta - \theta_0)$ – плотность теплового потока, Вт/м²; θ_0 – температура образца после его охлаждения ($\theta_0=0$); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); $\tau_{охл}$ – время охлаждения образца, с.

Из условия $Q_{нагр} = Q_{охл}$, имеем

$$\tau_{охл} = \frac{\sqrt{0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \tau_{нагр}}}{\alpha} \quad \text{или} \quad (10)$$

$$\frac{\tau_{охл}}{\tau_{нагр}} = \frac{\sqrt{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \frac{1}{2 \cdot \tau_{нагр}}}}{\alpha}. \quad (11)$$

В табл. 1 приведены рассчитанные по зависимости (11) значения $\tau_{охл}/\tau_{нагр}$ при шлифовании твердого сплава ВК8 ($\rho=14,5 \cdot 10^3$ кг/м³; $c=40$ кал/(кг·град); $\lambda=14$ кал/(м·с·град; $\alpha=10^4$ кал/(м²·с·град)). Как видно, с увеличением времени нагрева образца $\tau_{нагр}$ отношение $\tau_{охл}/\tau_{нагр}$ уменьшается, принимая значения меньше единицы.

Таблица 1

Расчетные значения $\tau_{охл}/\tau_{нагр}$

$\tau_{нагр}, \text{ с}$	0,062	0,25	1,0	4,0
$\tau_{охл}/\tau_{нагр}$	0,8	0,4	0,2	0,1

Используя зависимость (10), определим степень влияния времени охлаждения $\tau_{охл}$ на минимальное основное время обработки τ_{min} , описываемое зависимостью (6). Для этого данную зависимость представим в виде

$$\begin{aligned} \tau_{min} &= \frac{\tau}{n} + (n-1) \cdot \tau_{охл} = \frac{\tau}{n} + (n-1) \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \rho \cdot \lambda}{2} \cdot \frac{\tau}{n^2}} = \\ &= \frac{1}{n} \cdot \left(\tau - \frac{\sqrt{0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \tau}}{\alpha} \right) + \frac{\sqrt{0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \tau}}{\alpha}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\tau_{нагр} = \frac{\tau}{n^2}$; n – количество переходов; $\tau = \frac{П^2}{A}$ – время съема припуска $П$ за один переход при условии обеспечения заданной температуры шлифования θ , с.

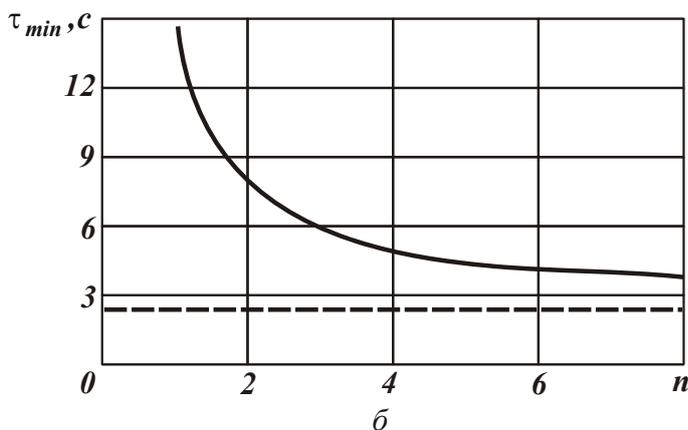
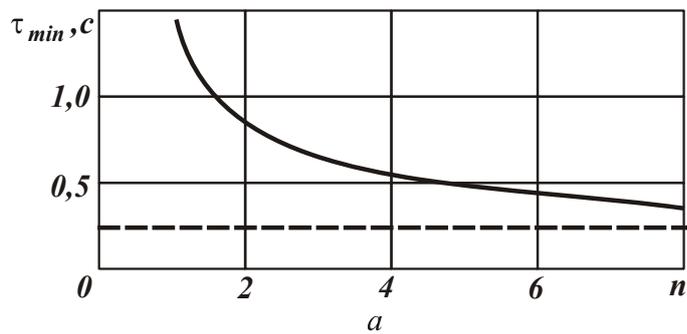


Рис. 3. Зависимость τ_{min} от количества переходов n : а – $П=0,1$ мм; б – $П=1$ мм.

Как и в зависимости (6), с увеличением количества переходов n происходит уменьшением τ_{min} , однако не бесконечно, а до конечного значения:

$$\tau_{min} = \frac{\sqrt{0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \tau}}{\alpha}. \quad (13)$$

На рис. 3 приведены рассчитанные по зависимости (12) значения τ_{min} для исходных данных, принятых в табл. 1. Для определения параметра A принято $\theta=1000^{\circ}\text{C}$; $\sigma=10^5$ Н/мм² (обработка твердого сплава ВК8), тогда $A=7 \cdot 10^{-9}$ м²/с. Как видно, с увеличением количества переходов n величина τ_{min} уменьшается в 6 раз соответственно до значения 0,24 с (при $П=0,1$ мм) и до значения 2,4 с (при $П=1$ мм).

Следовательно, интенсивность уменьшения величины τ_{min} с увеличением количества переходов n не зависит от снимаемого припуска $П$.

В табл. 2 для сравнения приведены значения τ_{min} , полученные на основе зависимости (6), не учитывающей время охлаждения обрабатываемого образца между переходами. Как видно, эти значения меньше аналогичных значений τ_{min} , полученных с учетом времени охлаждения образца и приведенных на рис. 3. Отличие значений τ_{min} , полученных без учета и с учетом времени охлаждения образца между переходами, можно оценить коэффициентом k (табл. 2), который увеличивается с увеличением количества переходов n . Следовательно, эффект от прерывания процесса шлифования с целью охлаждения обрабатываемого образца с увеличением количества переходов n проявляется в меньшей мере.

Таблица 2

Расчетные значения коэффициента k для $П=0,1$ мм

n	1	2	3	4	8	16
$\tau_{min}, \text{с}$	1,43	0,715	0,477	0,357	0,178	0,089
k	1	1,17	1,33	1,5	2,18	3,53

Таблица 3

Расчетные значения $\tau_{нагр}$, $\tau_{охл}/\tau_{нагр}$ и l для $\Pi=0,1$ мм

n	1	2	3	4	8	16
$\tau_{нагр}$, с	1,43	0,357	0,159	0,089	0,022	0,0056
$\tau_{охл}/\tau_{нагр}$	–	0,337	0,505	0,675	1,358	2,693
l , м	–	10,7	4,74	2,7	0,66	0,17

В табл. 3 приведены расчетные значения $\tau_{нагр} = \frac{\tau}{n^2} = \frac{\Pi^2}{n^2 \cdot A}$ и $\tau_{охл}/\tau_{нагр}$, установленные на основе зависимостей (10) и (11) для $\Pi=0,1$ мм. Исходные данные для расчета взяты те же, что и для табл. 1. Как видно, с увеличением количества переходов n , время $\tau_{нагр}$ уменьшается, а отношение $\tau_{охл}/\tau_{нагр}$, наоборот, увеличивается, принимая при $n > 6$ значения, превышающие единицу, рис. 4.

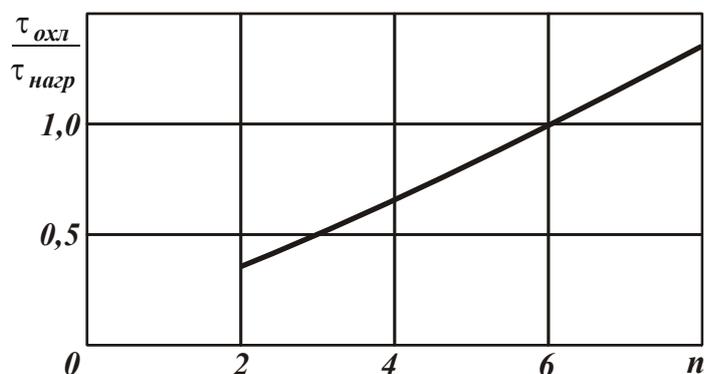


Рис. 4. Зависимость отношения $\tau_{охл}/\tau_{нагр}$ от количества переходов n .

Оценим возможности практической реализации данного решения на основе применения шлифования прерывистым кругом, рабочая поверхность которого состоит из чередующихся выступов (рабочих элементов) и впадин. Расчеты длины рабочего выступа круга $l = \tau_{нагр} \cdot V_{кр}$ при скорости круга $V_{кр} = 30$ м/с и $\Pi = 0,1$ мм (табл. 3, рис. 5) пока-

зали, что она принимает относительно большие значения, превышающие длину рабочей поверхности круга $\pi D_{кр}$, где $D_{кр}$ – диаметр круга, м. Следовательно, реализовать данные значения l в конструкции прерывистого круга не представляется возможным, т.е. с помощью прерывистого шлифования сложно осуществить условия обработки, соответствующие кривой 2 на рис. 1. Уменьшение длины рабочего выступа круга l и отношения $\tau_{охл}/\tau_{нагр}$ (что имеет место в прерывистых кругах) ведет к неполному остыванию обрабатываемого образца между переходами и реализации кривой 3 на рис. 1, согласно которой температура шлифования θ увеличивается с течением времени обработки. Данная закономерность подтверждается многочисленными результатами экспериментальных исследований прерывистого шлифования [1, 2]. Это свидетельствует о том, что при прерывистом шлифовании действительно сложно реализовать условия обработки, соответствующие кривой 2 на рис. 1. Для их осуществления нужны новые технические решения, связанные с возможностью периодического прерывания процесса шлифования за малые промежутки времени, составляющие доли секунды, что представляет довольно сложную задачу.

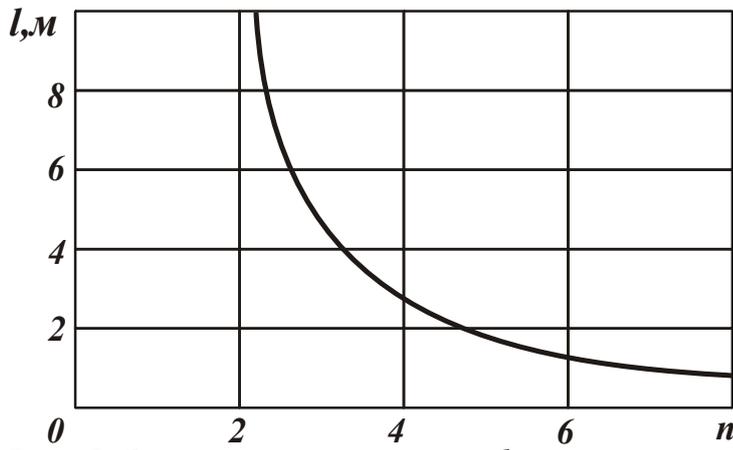


Рис. 5. Зависимость параметра l от количества переходов n .

Для оценки возможностей уменьшения основного времени обработки за счет периодического прерывания процесса шлифования с целью охлаждения обрабатываемого образца, проведем анализ зависимости (12). Очевидно, для того чтобы получить эффект обработки, необходимо выполнить условие:

$$\tau_{min} > \tau = \frac{\Pi^2}{A}, \text{ где } \tau - \text{ время}$$

съемы припуска Π за 1 переход при обеспечении заданной температуры шлифования θ . С учетом зависимости (12) имеем

$$\tau > \frac{1}{n} \cdot \left(\tau - \frac{\sqrt{0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \tau}}{\alpha} \right) + \frac{\sqrt{0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \tau}}{\alpha}. \quad (14)$$

Данное неравенство можно преобразовать к виду

$$\tau > \frac{c \cdot \rho \cdot \lambda}{2 \cdot \alpha^2}. \quad (15)$$

Расчетами установлено, что применительно к шлифованию твердого сплава ВК8 ($\rho=14,5 \cdot 10^3$ кг/м³; $c=40$ кал/(кг·град); $\lambda=14$ кал/(м·с·град; $\alpha=10^4$ кал/(м²·с·град)) основное время обработки τ должно быть больше 0,0406 с. При невыполнении данного условия эффект уменьшения основного времени обработки достигаться не будет. Исходя из зависимости $\tau = \Pi^2 / A$, можно определить минимальное значение снимаемого припуска Π , соответствующего минимальному значению $\tau=0,0406$ с. Для $A=7 \cdot 10^{-9}$ м²/с, имеем $\Pi > 16,7$ мкм.

Произведем уточненный расчет наименьшего основного времени обработки с учетом времени полного остывания обрабатываемого образца между переходами. Полученное выше решение предполагает одинаковые по продолжительности переходы. Однако, в связи с наличием этапов охлаждения образца результаты оптимизации, полученные в предыдущих параграфах, могут быть несколько иными. Поэтому проведем уточнение данного решения. Зависимость (3), описывающую основное время обработки в два перехода, с учетом зависимости (10), представим в виде

$$\tau = \left[\frac{\Pi_1^2 + (\Pi - \Pi_1)^2}{A} \right] + \tau_{охл} = \left[\frac{\Pi_1^2 + (\Pi - \Pi_1)^2}{A} \right] + \frac{1}{\alpha} \cdot \sqrt{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \frac{\Pi_1^2}{2A}}, \quad (16)$$

где $\tau_{нагр} = \Pi_1^2 / A$.

Используя необходимое условие экстремума $\tau'_{\Pi_1} = 0$, определим экстремальное значение припуска Π_1 , удаляемого на первом переходе:

$$\Pi_1 = \frac{\Pi}{2} - \frac{\sqrt{0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot A}}{4\alpha}. \quad (17)$$

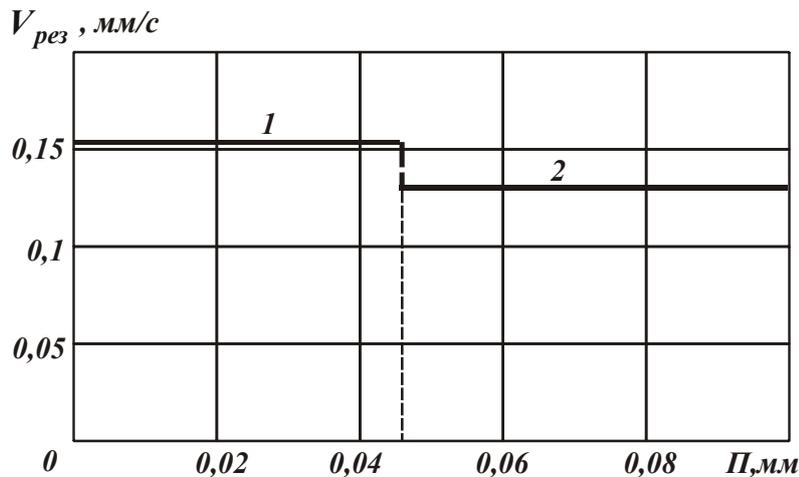


Рис. 6. Характер изменения скорости радиальной подачи $V_{рез}$ по переходам: 1 – первый переход; 2 – второй переход.

Как видно, величина Π_1 меньше $\Pi/2$, тогда как в предыдущем решении для $n=2$, вытекающем из зависимости (5): $\Pi_1 = \Pi/2$. Например, при $\Pi = 0,1$ мм, как установлено расчетами, $\Pi_1 = 45,8$ мкм, а $\Pi_2 = \Pi - \Pi_1 = 54,2$ мкм. При большем снимаемом припуске, например, $\Pi = 1$ мм значения Π_1 и Π_2 почти одинаковы. Следовательно, на первом переходе удаляется при-

пуск $\Pi_1 < \Pi/2$, а на втором переходе – припуск $\Pi_1 > \Pi/2$. Соответственно, на 1 и 2 переходах реализуются разные скорости радиальной подачи $V_{рез1} > V_{рез2}$, рис. 6.

Минимальное τ_{min} определяется подстановкой зависимости (17) в (16):

$$\tau_{min} = \frac{\Pi^2}{2A} + \frac{\Pi}{2\alpha} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \rho \cdot \lambda}{2A} - \frac{c \cdot \rho \cdot \lambda}{16\alpha^2}}. \quad (18)$$

Значение τ_{min} в данном случае будет больше аналогичного значения

$$\tau_{min} = \frac{\Pi^2}{2 \cdot A},$$

вытекающего из зависимости (6), полученной без учета продолжительности этапа охлаждения обрабатываемого образца. Таким образом показано, что введение дополнительного этапа охлаждения образца изменяет характер съема припуска: на первом переходе удаляется меньшая часть припуска, а на втором – большая часть. При этом справедливо соотношение $V_{рез1} > V_{рез2}$.

Для исходных данных: $\theta = 1000^\circ\text{C}$; $\sigma = 10^5$ Н/мм² (обработка твердого сплава ВК8: $\rho = 14,5 \cdot 10^3$ кг/м³; $c = 40$ кал/(кг·град); $\lambda = 14$ кал/(м·с·град); $\alpha = 10^4$ кал/(м²·с·град)), $A = 7 \cdot 10^{-9}$ м²/с; $\Pi = 0,1$ мм определена величина τ_{min} :

$$\tau_{min} = 0,715 \text{ с} + 0,12 \text{ с} - 0,005 \text{ с} = 0,83 \text{ с}.$$

Как видно, величина τ_{min} незначительно отличается от первого слагаемого, определяющего основное время обработки без учета времени дополнительного этапа охлаждения образца. Следовательно, за счет прерывания процесса шлифования и охлаждения образца между переходами можно существенно уменьшить основное время обработки при одновременном обеспечении заданной температуры шлифования θ .

Необходимо отметить, что эффект уменьшения величины τ_{min} в данном случае выше, чем в аналогичном решении (11). Так, при $\Pi=0,1$ мм величина $\tau_{min}=0,83$ с, тогда как согласно рис. 3,а, $\tau_{min}=0,835$ с (при $n=2$). Следовательно, шлифование с уменьшающейся по переходам скоростью радиальной подачи $V_{рез}$ позволяет в большей степени уменьшить τ_{min} по сравнению с шлифованием с одинаковой на каждом переходе скоростью радиальной подачи $V_{рез}$. Однако, как видно, отличие значений τ_{min} для двух случаев незначительно. Практически реализовать эти схемы обработки, как уже отмечалось выше, затруднено в связи с небольшой продолжительностью переходов, составляющей доли секунды. Основными направлениями их осуществления следует рассматривать применение прерывистого шлифования (вибрационного шлифования, в том числе с использованием ультразвуковых колебаний), различных адаптивных систем управления и схем шлифования, где образец движется не по нормали к рабочей поверхности круга, а по касательной к кругу (в тангенциальном направлении), например, схем плоского и круглого наружного шлифования, рис. 7.

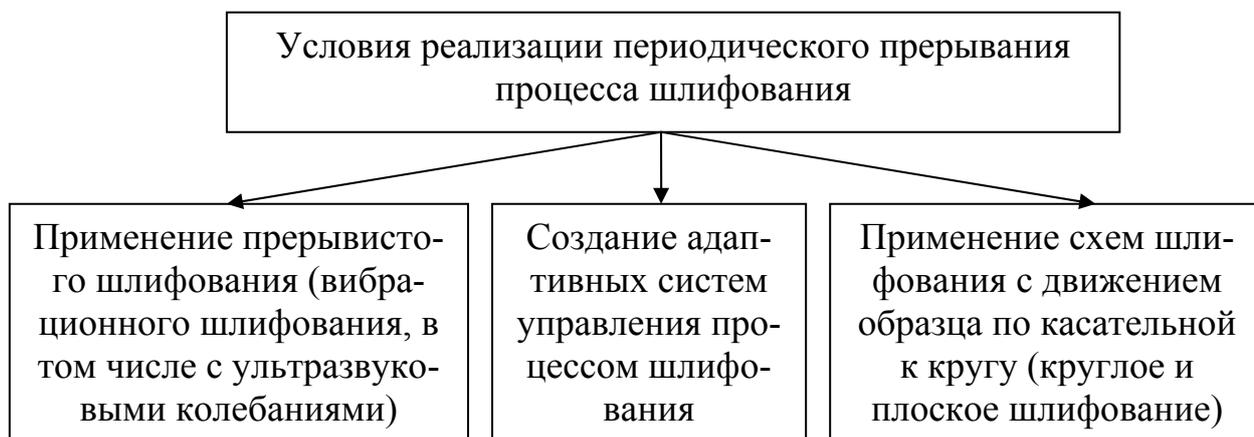


Рис. 7. Структурная схема условий реализации периодического прерывания процесса шлифования.

Для оценки достоверности теоретических решений были проведены экспериментальные исследования. Установлено, что периодическое прерывание процесса шлифования за счет применения прерывистого круга позволяет существенно снизить теплонапряженность процесса, исключить образование на обрабатываемых поверхностях прижогов и других температурных дефектов и увеличить производительность обработки. Так, применение прерывистого алмазного круга по сравнению с обычным алмазным кругом на органической связке при торцовом шлифовании твердосплавных пластин позволило до 5 раз увеличить производительность при обеспечении бесприжоговой обработки, что хорошо согласуется с полученными теоретическими решениями.

Экспериментально установлено, что шлифование твердосплавных инструментов алмазным кругом на металлической связке после его электроэрозионной правки по сравнению с обычным алмазным шлифованием и алмазным электроэрозионным шлифованием (основанным на введении в зону резания электрических разрядов) позволяет повысить качество обработки, обеспечивает формирование в поверхностном слое материала благоприятных сжимающих

остаточных напряжений, исключает образование прижогов и микротрещин, а также лунок, возникающих от действия электрических разрядов при алмазном электроэрозионном шлифовании. Эффект шлифования достигается за счет обеспечения высокой режущей способности алмазного круга и снижения энергоемкости обработки, что позволяет рекомендовать данный метод для шлифования и заточки твердосплавных инструментов.

Экспериментально установлено, что при алмазном торцовом шлифовании вращающегося кольца из композиционного материала на основе релита зависимость вероятности появления прижогов на его поверхности от увеличения площади контакта круга с кольцом имеет экстремум, принимая минимальное значение при условии, когда площадь контакта круга с кольцом равна приблизительно половине обрабатываемой поверхности. Полученный экспериментальный результат согласуется с теоретическими решениями, что свидетельствует об их достоверности.

На основе экспериментальных исследований показано, что применение высокопористых абразивных кругов, обладающих повышенной режущей способностью, позволяет полностью исключить образование прижогов и микротрещин на обрабатываемых поверхностях при глубинном шлифовании (с глубиной шлифования до 4 мм) елочных замков турбинных лопаток, изготовленных из жаропрочного сплава на никелевой основе марки ЧС88У-ВИ. При этом производительность обработки соответствует производительности лезвийной обработки, что позволяет перейти от малоэффективной технологии фрезерования к высокопроизводительному глубинному шлифованию, обеспечивающему требуемое качество обработки. Полученные экспериментальные данные подтверждают теоретические результаты, согласно которым при больших глубинах шлифования и небольшой скорости детали можно снизить тепловую напряженность процесса без уменьшения производительности обработки.

Экспериментально доказано, что при обработке деталей сельскохозяйственной техники, восстановленных методом наплавки наплавочной проволоки Нп-12Х18Н9Т (HRC 35) и ПП-Нп-10Х14Т (HRC 52) диаметром 1,2 мм, с целью снижения тепловой напряженности процесса и повышения качества обработки эффективно вместо шлифования использовать лезвийную обработку резцами из синтетических сверхтвердых материалов на основе нитрида бора типа гексанит-Р (К10) и киборита (К11). При этом применение резцов с отрицательным передним углом (до -30° ... -40°) позволяет существенным образом упрочнить поверхностный слой обрабатываемого материала и тем самым обеспечить высокую износостойкость восстановленных деталей.

Литература: 1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. 2. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. Ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 2. "Теплофизика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2003. – 625 с. 3. Новиков Ф.В., Кленов О.С. Оптимизация параметров операций шлифования с учетом ограничений по температуре резания // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2009. – № 2. – С. 45-53. 4. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. Пособие / Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Серов Б.С., Якимов А.А. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИКИ ПРОЦЕССА МИКРОРЕЗАНИЯ ПРИ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, **Гасанов М.И.**, канд. техн. наук.
(г. Харьков, Украина)

The results of studies of tension force in the process of cutting a diamond grinding.

Алмазные круги широко применяются при шлифовании труднообрабатываемых материалов. Исследованию алмазного шлифования постоянно уделяется большое внимание [1,2,3]. Однако, имеющиеся результаты в большинстве случаев носят частный характер, т.к. получены экспериментальным путем. Целью данной работы является аналитическое описание процесса микрорезания единичным зерном и установление его физических закономерностей.

Для разработки математической модели процесса микрорезания, рассмотрим режущее зерно в виде сферы, представляя ее пакетом круглых дисков бесконечно малой толщины разных диаметров, как показано на рис. 1. Толщина среза a_{zi} каждым диском будет зависеть от его диаметра и заданной толщины среза $a_z = a_z - (R - R_i)$, где R - радиус зерна (радиус центрального диска); R_i - радиус текущего диска.

Рассмотрим закономерности резания центральным диском. Предположим, на диск действует сила P_{y1} , обеспечивающая резание с толщиной среза a_z . При перемещении диска в горизонтальном направлении со скоростью V_0 происходит сжатие передних слоев обрабатываемого материала, рис. 2. В условных плоскостях, расположенных под разными углами к направлению движения диска, возникают напряжения сдвига. Материал будет деформироваться до тех пор, пока в определенной плоскости касательное напряжение достигнет предельного значения и произойдет сдвиг. В последующем процесс сдвига элементов материала будет периодически повторяться. Установим положение условной плоскости сдвига, определяемой углом сдвига β . Для этого определим силу F , действующую в плоскости сдвига, путем суммирования элементарных сил, возникающих на элементарных площадках контакта диска с обрабатываемым материалом по методике, приведенной в работах [4, 5]. В первом приближении давление P_T примем равным твердости обрабатываемого материала HV . С учетом $P_T = f \cdot P_p$, имеем

$$F = \int_{\varphi_0}^{90^\circ} HV \cdot R \cdot B \cdot [\cos(\varphi + \beta) - f \cdot \sin(\varphi + \beta)] \cdot d\varphi, \quad (1)$$

где B - ширина диска, м; φ - текущее значение угла контакта диска с материалом, град; f - коэффициент трения зерна с материалом.

С учетом $f = \tan \psi$ (где ψ - угол трения, рис. 2), зависимость (1) примет вид

$$F = \frac{2 \cdot HV \cdot R \cdot B}{\cos \psi} \cdot \cos \left(45^\circ + \frac{\varphi_0}{2} + \psi + \beta \right) \cdot \sin \left(45^\circ - \frac{\varphi_0}{2} \right), \quad (2)$$

Касательное напряжение τ в плоскости сдвига равно $\tau = F / (B \cdot I)$, где $I = a_z / \sin \beta$ - длина плоскости сдвига, м. С учетом (2), имеем

$$\tau = \frac{2 \cdot HV \cdot R}{a_z \cdot \cos \psi} \cdot \sin \beta \cdot \cos \left(45^\circ + \frac{\varphi_0}{2} + \psi + \beta \right) \cdot \sin \left(45^\circ - \frac{\varphi_0}{2} \right). \quad (3)$$

Напряжение τ неоднозначно зависит от β . С увеличением β за счет множителя $\sin \beta$ оно растет, а за счет множителя $\cos \left(45^\circ + \frac{\varphi_0}{2} + \psi + \beta \right)$ - уменьшается, рис. 3. Следовательно, напряжение изменяется по экстремальной зависимости от β . Значение β , соответствующее максимуму напряжения τ , определяет положение плоскости сдвига.

Приравнявая производную τ'_β нулю, получим

$$\beta = 22,5^\circ - \frac{\varphi_0}{4} - \frac{\psi}{2}. \quad (4)$$

Угол β тем больше, чем меньше φ_0 и ψ . Максимальное значение β равно $22,5^\circ$. Разрешая (4) относительно угла φ_0 и подставляя полученное выражение в (3), при условии $\tau = \tau_{\text{сдв}}$ (где $\tau_{\text{сдв}}$ - предел прочности обрабатываемого материала на сдвиг, Па), имеем:

$$\sin^2 \beta \cdot \sin(\psi + 2 \cdot \beta) = \frac{a_z \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot \cos \psi}{2 \cdot HV \cdot R}. \quad (5)$$

Зависимость (5) связывает угол сдвига β с основными параметрами процесса микрорезания. С увеличением соотношений a_z / R и $\tau_{\text{сдв}} / HV$ угол сдвига β растет, а с увеличением угла трения ψ - снижается. Учитывая небольшие значения угла β ($\beta < 22,5^\circ$), в первом приближении можно принять $\sin \beta \approx \beta$; $\sin(\psi + 2\beta) \approx 2 \cdot \beta$. Зависимость (5) упростится

$$\beta = \sqrt[3]{\frac{a_z \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot \cos \psi}{4 \cdot HV \cdot R}}. \quad (6)$$

Данная зависимость определяет угол сдвига β при резании центральным диском. Для других дисков зависимость (6) примет вид:

$$\beta_i = \sqrt[3]{\left[a_z - (R - R_i) \right] \cdot \frac{\tau_{\text{сдв}} \cdot \cos \psi}{4 \cdot HV \cdot R_i}}. \quad (7)$$

Чем меньше R_i , тем меньше β_i . Наибольший угол сдвига β имеет центральный диск. На рис. 4 графически показан характер изменения угла β_i для различных дисков. На рис. 5 показан вид сверху границы пересечения элементарных плоскостей сдвига с обрабатываемой поверхностью. Граница имеет сложную симметричную форму, что согласуется с экспериментальными данными [1,2,3]. Для определения тангенциальной составляющей силы резания P_{z1} рассмотрим бесконечно малую площадку контакта диска с материалом $B \cdot R \cdot d\varphi$ и спроектируем на ось ОХ действующие на ней силы: $HV \cdot B \cdot R \cdot d\varphi$ и $f \cdot HV \cdot B \cdot R \cdot d\varphi$ (рис. 6). Тогда

$$P_{z1} = \int_{\varphi_0}^{90^\circ} HV \cdot B \cdot R \cdot d\varphi \cdot \left[\cos \varphi - f \cdot \cos(90^\circ - \varphi) \right]. \quad (8)$$

Подставим вместо угла φ_0 разрешенную относительно φ_0 зависимость (4) с учетом $f = \operatorname{tg} \psi$:

$$P_{z1} = \frac{2 \cdot HV \cdot B \cdot R}{\cos \psi} \cdot \sin 2\beta \cdot \sin(2\beta + \psi). \quad (9)$$

Принимая $\sin 2\beta \approx 2\beta$; $\sin(2\beta + \psi) \approx 2\beta$ и подставляя в (9) зависимость (6), имеем:

$$P_{z1} = 3 \cdot B \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{HV \cdot R}{\cos \psi} \right)^2 \cdot (a_z \cdot \tau_{\text{сдв}})^2} = \frac{8 \cdot HV \cdot B \cdot R}{\cos \psi} \cdot \beta^2. \quad (10)$$

Сила P_{z1} увеличивается с ростом всех входящих в (10) параметров. Уменьшить P_{z1} при $a_z = \text{const}$ можно уменьшением R и ψ , т.е. резанием “острым” зерном с применением технологических сред, снижающих коэффициент трения зерна с обрабатываемым материалом.

Для определения силы P_{y1} спроектируем элементарные силы, действующие на площадке $B \cdot R \cdot d\varphi$, на ось OY и проинтегрируем полученное выражение в пределах изменения угла φ - от φ_0 до 90° (рис. 6).

$$P_{y1} = \frac{2 \cdot HV \cdot B \cdot R}{\cos \psi} \cdot \sin \left(45^\circ + \frac{\varphi_0}{2} + \psi \right) \cdot \sin \left(45^\circ - \frac{\varphi_0}{2} \right). \quad (11)$$

Подставим вместо φ_0 зависимость (4), разрешенную относительно φ_0 с учетом $f = \operatorname{tg} \psi$:

$$P_{y1} = \frac{2 \cdot HV \cdot B \cdot R}{\cos \psi} \cdot \cos 2\beta \cdot \sin(2\beta + \psi). \quad (12)$$

В силу малости углов β и ψ возможны упрощения: $\cos 2\beta \approx 1$; $\sin(2\beta + \psi) \approx 2\beta$. Тогда

$$P_{y1} = \frac{4 \cdot HV \cdot B \cdot R}{\cos \psi} \cdot \beta. \quad (13)$$

С учетом зависимости (6) сила P_{y1} выразится

$$P_{y1} = 3 \cdot B \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{HV \cdot R}{\cos \psi} \right)^2 \cdot (a_z \cdot \tau_{\text{сдв}})}. \quad (14)$$

Сила P_{y1} тем больше, чем больше параметры HV , R , a_z , $\tau_{\text{сдв}}$, ψ . В отличие от зависимости (10), в (14) первый множитель подкоренного выражения входит в большей степени, а второй множитель – в меньшей степени. Следовательно, силу P_{z1} определяют параметры a_z и $\tau_{\text{сдв}}$, а силу P_{y1} - параметры HV и R . Коэффициент резания-царапания $K_{\text{рез}} = P_{z1} / P_{y1}$ описывается зависимостью

$$K_{\text{рез}} = 2 \cdot \beta = 3 \sqrt[3]{\frac{2 \cdot a_z \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot \cos \psi}{HV \cdot R}}. \quad (15)$$

Коэффициент $K_{рез}$ тем больше, чем больше соотношения a_z / R и $\tau_{сдв} / HV$ и меньше угол ψ

$$\sigma = 3 \cdot 3 \sqrt{\frac{HV \cdot R}{a_z \cdot \cos \psi} \cdot \tau_{сдв}^2} = \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{\beta} \quad (16)$$

Чем тверже и прочнее обрабатываемый материал, тем больше σ . Уменьшить σ можно за счет увеличения соотношения a_z / R и угла ψ . Как и коэффициент $K_{рез}$, условное напряжение резания σ вполне однозначно определяется углом сдвига β . С его увеличением σ уменьшается, а $K_{рез}$ - возрастает. Из зависимостей (15) и (16) вытекает, что произведение параметров $K_{рез} \cdot \sigma$ - постоянная величина, равная $4 \cdot \tau_{сдв}$. Это позволяет по произведению $K_{рез} \cdot \sigma$ оценить характер протекания процесса микрорезания, в частности, отдельно учесть долю резания и трения в энергетическом балансе процесса резания. Данный вывод согласуется с результатами исследований резания единичным зерном в виде конуса [4].

При резании зерно изнашивается, радиус округления его режущей кромки R увеличивается. В соответствии с зависимостями (10), (14), (15) и (16), это ведет к росту P_{z1} , P_{y1} , σ и уменьшению $K_{рез}$. Выразим R через величину линейного износа зерна x , представляя зерно в виде усеченного конуса с углом при вершине 2γ , рис. 7. Радиус вписанной окружности равен R , тогда выполняется соотношение

$$\frac{R}{R+x} = \sin \gamma, \quad \text{откуда} \quad R = x \cdot \frac{\sin \gamma}{(1 - \sin \gamma)} \quad (17)$$

Угол сдвига β с учетом зависимости (17), выразится

$$\beta = 3 \sqrt{\frac{a_z \cdot \tau_{сдв} \cdot \cos \psi}{4 \cdot HV \cdot x} \cdot \frac{(1 - \sin \gamma)}{\sin \gamma}} \quad (18)$$

Чем больше x и γ , тем меньше β . Это согласуется с экспериментальными данными проф. Сагарды А.А. [1], например, с полученной им эмпирической зависимостью:

$$K_{рез} = 1,8 \cdot k \cdot \left(1 - \frac{2\gamma}{\pi}\right), \quad (19)$$

где k - коэффициент, равный для хрупких сталей 0,5; для вязких сталей - 1,1.

С учетом величины x параметры P_{z1} , P_{y1} , σ выражаются:

$$P_{z1} = 3 \cdot b \cdot 3 \sqrt{\left[\frac{HV \cdot x \cdot \sin \gamma}{\cos \psi \cdot (1 - \sin \gamma)} \right] \cdot (a_z \cdot \tau_{сдв})^2}, \quad (20)$$

$$P_{y1} = 3 \cdot b \cdot 3 \sqrt{\left[\frac{HV \cdot x \cdot \sin \gamma}{\cos \psi \cdot (1 - \sin \gamma)} \right] \cdot (a_z \cdot \tau_{сдв})^2}, \quad (21)$$

$$\sigma = 3 \cdot 3 \sqrt{\left[\frac{HV \cdot x \cdot \sin \gamma}{a_z \cdot \cos \psi \cdot (1 - \sin \gamma)} \right] \cdot \tau_{сдв}^2} \quad (22)$$

Увеличение x ведет к росту P_{z1} , P_{y1} , σ , причем, силы P_{y1} в большей степени, что связано с ухудшением условий вдавливания зерна в обрабатываемый материал. Сравним полученные зависимости с известными зависимостями проф. Сагарды А.А. [1]:

$$P_{y1} = 3,86 \cdot HV \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot (\operatorname{tg} \gamma + 0,3) \cdot h_g^2, \quad (23)$$

$$\sigma = 6,94 \cdot HV \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot \gamma}{\pi}\right) \cdot (\operatorname{tg} \gamma + 0,3) \cdot \frac{k}{k_1}, \quad (24)$$

где h_g - глубина внедрения зерна в виде “острого” конуса в обрабатываемый материал, мм; HV - твердость обрабатываемого материала по Виккерсу, кГс/мм².

В отличие от зависимостей (23) и (24), зависимости (20), (21), (22) содержат величину линейного износа зерна x и в явном виде параметр $\tau_{сдв}$. Это позволяет более полно учесть закономерности микрорезания отдельным зерном. Геометрически параметры a_z , x взаимосвязаны посредством параметра H (рис. 7): $H = a_z + x$. Используя безразмерный параметр $\eta = x/H$, определяющий степень затупления зерна [115], толщина среза a_z выразится:

$$a_z = x \cdot \frac{(1-\eta)}{\eta}. \quad (25)$$

Подставляя (25) в (18), имеем:

$$\beta = \sqrt[3]{\frac{\tau_{сдв} \cdot \cos \psi}{4 \cdot HV} \cdot \frac{(1-\eta)}{\eta} \cdot \frac{(1-\sin \gamma)}{\sin \gamma}}. \quad (26)$$

Угол сдвига β вполне однозначно определяется параметром η , изменяющимся в пределах 0...1. Значения $\eta \rightarrow 0$ соответствуют работе “острым” зерном, значения $\eta \rightarrow 1$ - работе затупленным зерном. В реальных условиях $\eta = \eta_0 \dots 1$, где $\eta_0 > 0$.

Составляющие силы резания P_{z1} , P_{y1} и параметры σ , $K_{рез}$ с учетом (25) выражаются (принимая в первом приближении $B = x$).

$$P_{z1} = 3 \cdot x^2 \cdot \sqrt[3]{\left[\frac{HV \cdot \sin \gamma}{\cos \psi \cdot (1-\sin \gamma)}\right] \cdot \left[\frac{(1-\eta) \cdot \tau_{сдв}}{\eta}\right]^2}, \quad (27)$$

$$P_{y1} = 3 \cdot x^2 \cdot \sqrt[3]{\left[\frac{HV \cdot \sin \gamma}{\cos \psi \cdot (1-\sin \gamma)}\right]^2 \cdot \frac{(1-\eta) \cdot \tau_{сдв}}{\eta}}, \quad (28)$$

$$K_{рез} = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{\tau_{сдв} \cdot \cos \psi}{4 \cdot HV} \cdot \frac{(1-\eta)}{\eta} \cdot \frac{(1-\sin \gamma)}{\sin \gamma}}, \quad (29)$$

$$\sigma = 3 \cdot \sqrt[3]{\frac{HV \cdot \sin \gamma}{\cos \psi \cdot (1-\sin \gamma)} \cdot \frac{\eta}{(1-\eta)} \cdot \tau_{сдв}^2}. \quad (30)$$

Увеличить $K_{рез}$ и уменьшить σ можно уменьшением безразмерного параметра η . Из зависимостей (17) и (25) следует соотношение:

$$\frac{a_z}{R} = \frac{(1-\eta)}{\eta} \cdot \frac{(1-\sin \gamma)}{\sin \gamma}. \quad (31)$$

Чем больше параметр η , тем меньше a_z / R . При $\eta \rightarrow 1$ выполняется условие $(a_z / R) \rightarrow 0$.

Таблица 1

Расчетные значения a_z / R

η	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$a_z / R, (\gamma=45^\circ)$	3,87	1,72	1,0	0,65	0,43	0,29	0,18	0,10	0,048	0
$a_z / R, (\gamma=60^\circ)$	1,35	0,6	0,35	0,22	0,15	0,10	0,06	0,035	0,016	0

По данным проф. Богомолова Н.И., стружкообразование начинается при $a_z / R = 0,4 \dots 0,8$, а по данным проф. Крагельского И.В. – при $a_z / R = 0,14 \dots 0,17$. Наиболее интенсивный процесс стружкообразования наступает при $a_z / R = 0,25 \dots 0,35$. Исходя из табл. 1 процесс стружкообразования происходит: для $\gamma = 45^\circ$ при $\eta < 0,9$; для $\gamma = 60^\circ$ при $\eta < 0,7$. Угол $\gamma = 45^\circ \dots 60^\circ$ принят на основании приведенных в работах проф. Семко М.Ф., проф. Сагарды А.А. данных обмера алмазных зерен. Зная экспериментальные значения параметра η для реальных условий шлифования, по зависимости (31) можно установить соотношение a_z / R . Это открывает новые возможности исследования процесса шлифования и его эффективного применения.

Согласно экспериментальным данным, приведенным в работе [1], с увеличением силы P_{y1} (при микрорезании алмазным конусом: $2\gamma = 120^\circ$ и $R = 20$ мкм) коэффициент $K_{рез}$ возрастает до определенного значения, затем становится почти постоянным, рис. 8. При этом толщина среза a_z с увеличением P_{y1} возрастает, рис. 9 [1]. Это согласуется с расчетной зависимостью (15), т.к. с увеличением толщины среза a_z (при постоянных значениях HV , R , $\tau_{сдв}$, ψ) коэффициент резания $K_{рез}$ увеличивается.

Уменьшение $K_{рез}$ с увеличением твердости обрабатываемого материала HV (рис. 8) связано с уменьшением в зависимости (15) соотношения $\tau_{сдв} / HV$. Например, для твердого сплава ВК8 оно меньше, чем для стали и меди.

В табл. 2 приведены расчетные данные коэффициента $K_{рез.расч}$ при микрорезании стали, полученные по зависимости (15) с использованием экспериментальных значений толщины срезов a_z (рис. 9). Для сравнения в табл. 2 приведены экспериментальные значения $K_{рез.эксп}$, взятые из рис. 8.

При $P_{y1} \geq 3,0$ Н расхождение расчетных и экспериментальных значений коэффициента резания составляет до 10%, что свидетельствует о достоверности полученных теоретических зависимостей. В табл. 3 приведены рассчитанные по зависимости (31) значения безразмерного параметра η с учетом экспериментальных данных соотношения a_z / R для $\gamma = 60^\circ$ (рис. 9).

Значения коэффициента резания
($R = 20$ мкм; $HV = 5200$ МПа; $\tau_{сдв} = 700$ МПа; $\psi = 30^\circ$)

P_{y1}	2,0	3,0	5,0	7,0	9,0
$K_{рез.расч}$	0,26	0,29	0,33	0,36	0,37
$K_{рез.эксп}$	0,2	0,3	0,35	0,35	0,35

Таблица 3

Расчетные значения η

$P_{y1}, Н$	2,0	3,0	5,0	7,0	9,0
a_z / R	0,075	0,1	0,15	0,2	0,22
η	0,674	0,607	0,508	0,436	0,413

Расчетная зависимость для определения η имеет вид:

$$\eta = \frac{1}{\left[1 + \frac{a_z}{R} \cdot \frac{\sin \gamma}{(1 - \sin \gamma)} \right]} \quad (32)$$

Для $\gamma = 60^\circ$:

$$\eta = \frac{1}{1 + 6,46 \cdot \frac{a_z}{R}} \quad (33)$$

Исходя из табл. 3, с увеличением силы P_{y1} значения a_z / R увеличиваются, а параметра η - уменьшаются в пределах $\eta < 1$. Согласно зависимости (29), уменьшение η ведет к увеличению коэффициента резания $K_{рез}$, что соответствует экспериментальным данным. Таким образом, получены теоретические решения, которые позволяют более глубоко раскрыть физическую сущность алмазного шлифования, определяют пути его интенсификации.

Литература: 1. Синтетические алмазы в машиностроении / Под ред. В.Н. Бакуля. – К.: Наук. думка, 1976. – 352 с. 2. Захаренко И.П. Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента. – К.: Наук. думка, 1981. – 300 с. 3. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с. 4. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с. 5. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования. – Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Одесса, 1995. – 36 с.

УДК 621.923

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПРИ ШЛИФОВАНИИ НА СТАНКАХ МААГ

Якимов А.А., канд. техн. наук (г. Одесса, Украина)

In this paper, a relation of the elastic compliance of gear grinding machine 5851 (MAAG) with an accuracy of processing.

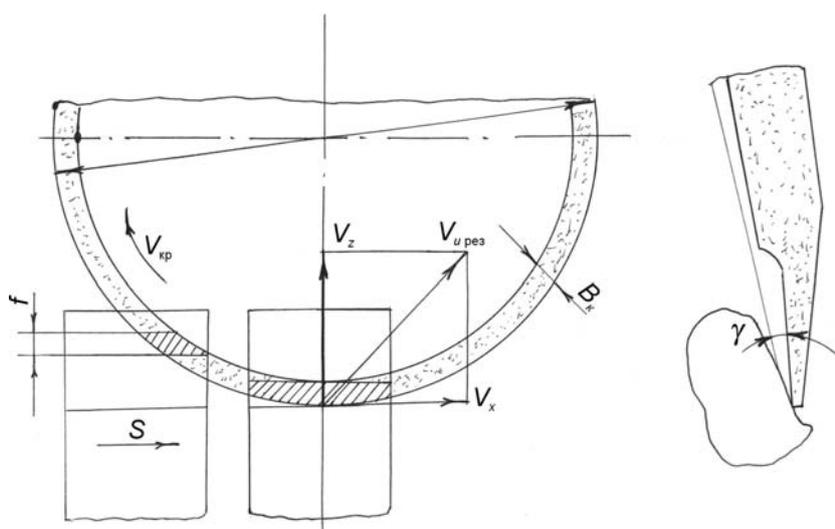
Проблема точности обработки зубчатых колес по-прежнему актуальна и требует дальнейших исследований [1]. При шлифовании зубчатых колес на станках типа МААГ возникают силы резания и силы инерции качающихся частей станка. Под воздействием сил резания режущая кромка тарельчатого шли-

фовального круга смещается относительно профиля боковых поверхностей зубьев колеса, что вызывает погрешность обработки. Поэтому целью работы является установление связи податливости упругой системы зубошлифовального станка 5851 (МАОГ) с точностью обработки.

Для определения силы резания воспользуемся первоначально известным уравнением для торцевого шлифования [2]:

$$F_Z = C_p \cdot l \cdot k \cdot B_k \cdot b \cdot a^{0,75}, \quad (1)$$

где C_p – коэффициент; a – средняя толщина среза абразивным зерном, мм; b – средняя ширина среза одним абразивным зерном, мм; B_k – ширина торцевой поверхности круга, мм; k – количество режущих зерен на единице длины; l –



средняя длина дуги контакта круга с изделием.

Шлифование на станках МАОГ осуществляется торцом круга. Однако наличие обкатки, скорость которой за период непостоянна, вызывает переменные силы. Скорость перемещения площади контакта шлифовального круга с обрабатываемым зубчатым колесом состоит из двух составляющих:

V_Z – скорость обкатки и V_x – скорость осевой подачи стола (рис. 1).

Результирующая скорость перемещения площади контакта равна

$$V_{u \text{ рез}} = \sqrt{V_Z^2 + V_x^2}. \quad (2)$$

Скорость обкатки, представляющая собой первую производную текущего радиуса вектора профиля эвольвенты ρ по времени τ , выражается

$$V_Z = \frac{d\rho}{d\tau} = \frac{dr}{d\varphi_0} \cdot \frac{d\varphi_0}{d\tau}, \quad (3)$$

где $\varphi_0 = \alpha_x + \text{inv}\alpha_x$.

Из геометрии эвольвентного зацепления известно, что

$$\frac{dr}{d\varphi_0} = r_0 \frac{\varphi_0}{\sqrt{\varphi_0^2 + 1}} = r_0 \frac{\text{tg}\alpha_x}{\sqrt{\text{tg}^2\alpha_x + 1}} = r_0 \sin\alpha_x. \quad (4)$$

Введем новую переменную φ , т. е. текущий угол поворота ролика обкатки относительно среднего положения. Производная угла поворота ролика обкатки φ_0 представляет собой угловую скорость зубчатого колеса

$$\frac{d\varphi_0}{d\tau} = \omega. \quad (5)$$

После подстановки выражений (4) и (5) в уравнение (2), получим

$$V_{u \text{ рез}} = \sqrt{V_x^2 + r_0^2 \sin^2 \alpha_x} \cdot \omega^2. \quad (6)$$

Из полученного выражения следует, что результирующая скорость (рис.1) перемещения площади контакта за период обкатки не остается постоянной. Следовательно, и сила резания, возникающая при шлифовании, также будет изменяться. Наряду с этим, площадь контакта шлифовального круга с боковой поверхностью зуба колеса по мере перемещения в направлении продольной подачи стола изменяется.

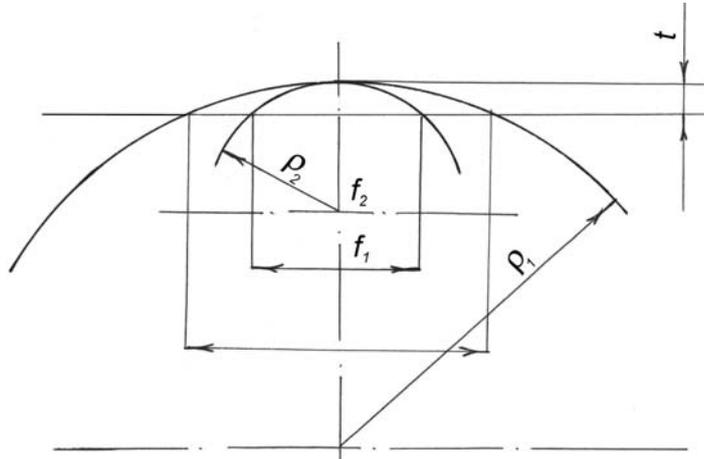


Рис. 2. Зависимость хорды f от радиуса кривизны эвольвенты.

Изменение площади контакта зависит от величины торцевой поверхности круга B_k и хорды f . Ширина торцевой поверхности B_k пропорциональна толщине снимаемого слоя t и обратно пропорциональна тангенсу угла наклона шлифовального круга γ :

$$B_k = \frac{t}{\operatorname{tg} \gamma}. \quad (7)$$

Хорда f зависит от радиуса кривизны эвольвенты и от толщины снимаемого слоя t (рис. 2). Если текущий радиус кривизны эвольвенты ρ на длине профиля, отсекаемого хордой f принять постоянным, т.е. на этом элементарном участке эвольвенту заменить окружностью радиуса ρ , то

$$f = 2\sqrt{\rho^2 - (\rho^2 - t^2)}. \quad (8)$$

Выражая радиус кривизны ρ через радиус основной окружности $\rho = r_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha_x$, получим

$$f = 2\sqrt{2t \cdot r_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha_x - t^2}. \quad (9)$$

Подставляя в уравнение (1) вместо l значение хорды f , а вместо B_k полученное выражение (7), получим

$$F_z = 2C_p \cdot C_v \cdot k \cdot \frac{t}{\operatorname{tg} \beta} \sqrt{2t \cdot r_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha_x - t^2} \cdot b \cdot a^{0.75}, \quad (10)$$

где C_v – коэффициент, учитывающий изменение скорости резания за период обкатки.

На зубошлифовальном станке МААГ предусмотрено постоянное положение исходной режущей рейки шлифовальных кругов 7 (рис. 3), а обкаточные движения осуществляет обрабатываемое зубчатое колесо. Обкаточное движение колеса осуществляется за счет поступательного и вращательного движения колеса посредством механизма обкатки. Скорость поперечного движения колеса изменяется по синусоидальному закону.

Такой характер движения вызывает силы инерции качающихся частей станка. Для определения сил инерции составим дифференциальное уравнение вынужденных колебаний системы. При этом сделаем допущение, что качающиеся части станка (ролик обката 1, делительный механизм 4, оправка с зубчатым колесом 5) представляют собой абсолютно жесткую систему (рис.3). Ленты механизма обкатки 2 являются упругими элементами.

За исходное уравнение принимаем

$$\frac{d\omega}{d\tau} \cdot J = P_j \cdot R_\rho, \quad (11)$$

где J – момент инерции качающихся частей станка; P_j – усилие, растягивающее ленту; R_ρ – радиус ролика обкатки.

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \frac{d^2\varphi}{d\tau^2} = -\varphi_{max}\Omega^2 \sin \Omega\tau + \frac{d^2\Delta\varphi}{d\tau^2}, \quad (12)$$

где φ_{max} – максимальный угол поворота зубчатого колеса в радианах; $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_\rho$ (рис. 4); φ_ρ – теоретический угол поворота в радианах; φ – истинный угол поворота в радианах; Ω – частота вынужденных колебаний механизма обкатки.

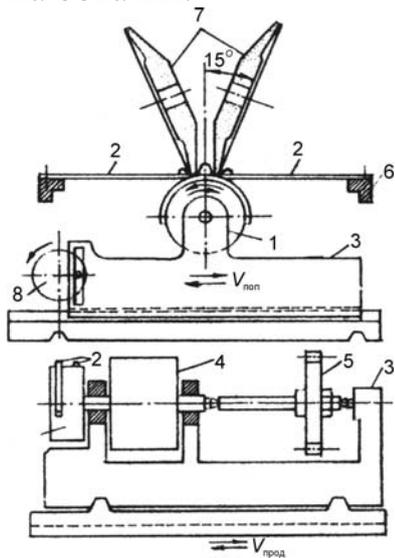


Рис.3.Схема работы зубошлифовального станка 5851 МААГ.

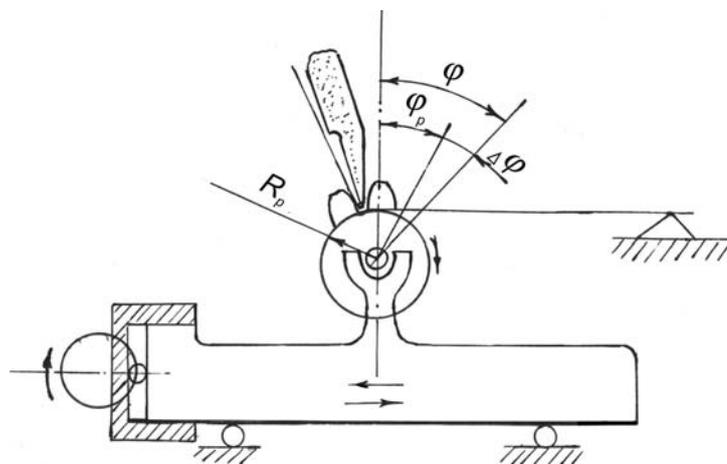


Рис. 4. Расчетная схема.

Усилие, растягивающее ленту, вычисляется по формуле

$$P_j = \frac{\Delta L \cdot F_l \cdot E_l}{L}, \quad (13)$$

где ΔL – величина деформации ленты, см; E_l – модуль упругости, кг/см²; F_l – площадь поперечного сечения ленты, см².

Величина деформации ленты может быть представлена в виде $\Delta L = \Delta\varphi \cdot R_\rho$.

Подставляя в исходное уравнение (11) выражения (13) и (12), получим

$$-\varphi_{max}\Omega^2 \sin \Omega\tau + \frac{d^2\Delta\varphi}{d\tau^2} + \frac{E_l \cdot F_l \cdot R_\rho}{L \cdot J} \cdot \Delta\varphi = 0. \quad (14)$$

Частное решение дифференциального уравнения находим в виде

$$\Delta\varphi = M \sin \Omega\tau - N \cos \Omega\tau. \quad (15)$$

$$\frac{d^2 \Delta\varphi}{d\tau^2} = -M \cdot \Omega^2 \sin \Omega\tau - N \cdot \Omega^2 \cos \Omega\tau. \quad (16)$$

После подстановки в уравнение (14) выражений (15) и (16) получим

$$-\varphi_{max} \Omega^2 \sin \Omega\tau - \Omega^2 (M \cdot \sin \Omega\tau + N \cdot \cos \Omega\tau) + A(M \cdot \sin \Omega\tau + N \cdot \cos \Omega\tau) = 0,$$

где $A = \frac{E_l \cdot F_l \cdot R_\rho}{L \cdot J}$. При $\Omega\tau = 0$; $-\Omega^2 \cdot N + A \cdot N = 0$. При $\Omega\tau = \frac{\pi}{2}$;

$-\varphi_{max} \Omega^2 - \Omega^2 M + A \cdot M = 0$. Откуда $M = \frac{\varphi_{max} \cdot \Omega^2}{A - \Omega^2}$ (M – максимальная амплитуда изменяющейся силы инерции P_j).

Текущий угол поворота ролика можно представить в виде $\varphi = \varphi_{max} \sin \Omega\tau$.

Сила инерции $P_{jmax} = M \cdot k'$, где k' – постоянная величина. Откуда

$$P_{jmek} = k' \cdot \frac{\varphi_{max} \cdot \Omega^2}{A - \Omega^2} \cdot \sin \Omega\tau. \quad (17)$$

Полученное выражение позволяет сделать выводы:

1. Сила инерции изменяется по синусоидальному закону и имеет максимальное значение в крайних положениях поперечного хода стола, когда $\Omega\tau = 90^\circ$.
2. Частота колебания сил инерции совпадает с частотой поперечного движения стола.

Полученное для расчета сил инерции уравнение (17) для инженерных расчетов не пригодно из-за сложности определения входящих в него параметров φ_{mek} ; Ω ; $\Omega\tau$. Для вывода уравнения, пригодного для инженерных расчетов, воспользуемся полученными экспериментальными данными. Введем коэффициент

$$X = \frac{P_{jmax}}{P_{j0max}},$$

где P_{j0max} – величина силы инерции, определяемая экспериментально при каком-нибудь режиме:

$$X = \frac{P_{jmax}}{P_{j0max}} = \frac{R_\rho \cdot \varphi_{max} \cdot \Omega^2 \cdot A_0}{R_{\rho_0} \cdot \varphi_{0max} \cdot \Omega_0^2 \cdot A}. \quad (18)$$

Поскольку

$$\varphi_{max} = \frac{l_{xc}}{R_\rho}; \quad \frac{\Omega^2}{\Omega_0^2} = \frac{n^2}{n_0^2}; \quad A = \frac{E_l \cdot F_l \cdot R_\rho}{L \cdot J},$$

после подстановки полученных выражений в (18), получим

$$X = \frac{l_{xc} \cdot n^2 \cdot R_{\rho,0} \cdot J}{l_{xc,0} \cdot n_0^2 \cdot R_\rho \cdot J_0}.$$

Параметры $l_{xc,0}$, n_0 , $R_{0\rho}$ выбираем для какой-нибудь экспериментальной точки. Обозначив $C = \frac{P_{j0} \cdot R_{0\rho}^2}{l_{0xc} \cdot n_0^2}$, получим $P_{jmax} = C \cdot l_{xc} \cdot n \cdot \frac{J}{R_{\rho}^2 \cdot J_0}$, где $\frac{J}{J_0}$ – отношение моментов инерции качающихся частей станка (находим из табл. 1)

Таблица 1

D_{ρ} , мм	40	50	60	70	80	90	100	110
J/J_0	0,81	0,82	0,85	0,87	0,9	0,95	1,04	1,15

Для определения постоянного коэффициента $R_{0\rho}$ была выбрана экспериментальная точка $R_{0\rho} = 54$ мм, $l_{0xc} = 30$ мм, $P_{j0max} = 2,3$ кг, $n_0 = 90,9$, $C = 0,027$:

$$F_{jmax} = 0,027 \cdot l_{xc} \cdot n^2 \cdot \frac{J}{R_{\rho}^2 \cdot J_0}. \quad (19)$$

Для расчета точности изготовления зубчатых колес еще недостаточно иметь только теоретические выражения для расчета сил резания и сил инерции.

Для оценки влияния сделанных допущений при выводе этих уравнений нужна экспериментальная проверка. В связи с этим была поставлена серия опытов, которые проводились в два этапа: 1) определение сил, возникающих при зубошлифовании на станках МААГ; 2) определение жесткости основных узлов станка. Составляющие усилия резания F_x , F_y , F_z измерялись специальными динамометрами (рис. 5).

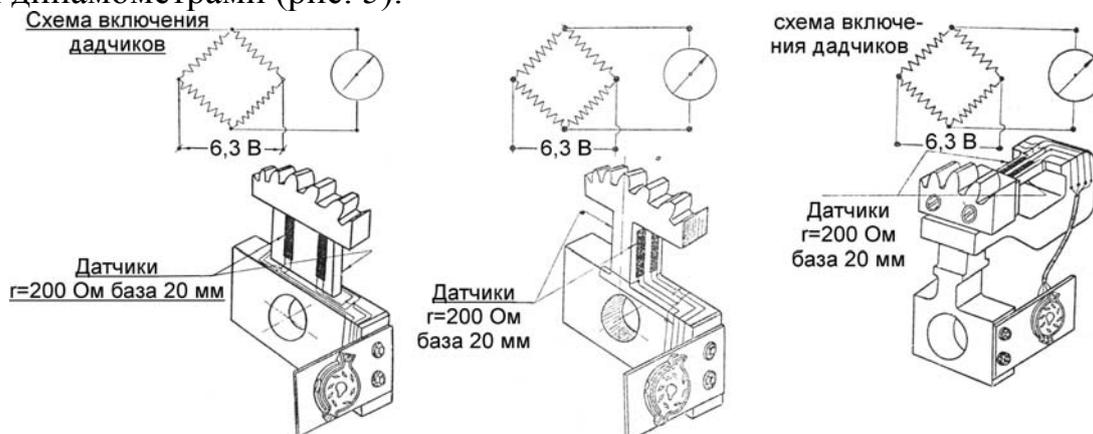


Рис. 5. Специальные динамометры для измерения составляющих усилий резания F_x , F_y , F_z .

Динамометры имели форму зубчатых колес с ослабленными звеньями в плоскости действия составляющих сил. Силы инерции качающихся частей станка измерялись динамометром, представляющим собой колодку с упругим элементом. Этот динамометр закреплялся на кронштейне станка 6 (рис. 3), предназначенным для крепления лент. Ленты крепились к динамометру. На упругие элементы динамометров наклеивались по четыре датчика сопротивления (база 20 мм, сопротивление 200 ом, констант диаметром 0.025 мм).

В табл. 2 представлены экспериментальные значения составляющей силы

резания (F_y , Н) от глубины шлифования (t , мм) и числа двойных ходов стола (n , ход/мин) при длине поперечного хода стола $l_{xc}=56$ мм.

Таблица 2

t , мм	0,02	0,05	0,1	0,15
$n=80$ ход/мин	18	30	48	65
$n=90$ ход/мин	30	40	54	71
$n=100$ ход/мин	35	45	59,9	74
$n=120$ ход/мин	40	54	63	78

В табл. 3 представлены экспериментальные значения нормальной составляющей силы резания (F_y , Н) от длины хода стола (l_{xc}) и числа двойных ходов стола (n , ход/мин) при шлифовании с разными глубинами резания t .

Таблица 3

l_{xc} , мм		32	36	40	44	48	52	56	60
$n=80$ ход/мин	$t=0,02$	8,0	10	12	13,5	15	16,5	18	20
	$t=0,05$	22	24	25	27	28	30	31	32
	$t=0,1$	41	42	43	45	46	47	48	49
$n=120$ ход/мин	$t=0,02$	29	30	33	35	36,5	38	39	40
	$t=0,05$	45	46	47	48	50	51	52,5	54
	$t=0,1$	58	59	60	61	62	63	64	65

Зависимость отношения тангенциальной составляющей F_z к нормальной составляющей F_y от глубины шлифования при $l_{xc}=40$ мм и $n=83,3$ ход/мин представлена в табл. 4.

Таблица 4

t	0,02	0,05	0,1	0,15
F_z/F_y	0,2	0,28	0,35	0,4

Обработка экспериментальных данных позволила получить экспериментальную зависимость для составляющей силы F_y :

$$F_y = \left[(-0,0163n^2 + 0,278n + 76,5) \cdot t^2 + (0,2n - 24) \cdot t + (-0,00245n^2 + 0,543n - 26,9) - (56 - l_{xc}) \cdot k \right] \cdot (2,9 - 0,038HRC). \quad (20)$$

Полученная зависимость справедлива для заправленных кругов. По мере затупления круга составляющая силы F_y будет увеличиваться. Информация о силах резания и силах инерции позволяет произвести расчеты точности обработки на станках 5851 (МАОГ). Однако для проведения расчетов по точности необходимо знать жесткость упругой системы – станок–инструмент–деталь. Было установлено, что наибольшее влияние на точность обработки оказывает деформация угла шпинделя, деформация шлифовального круга и деформация элементов механизма обкатки (лент).

Деформация шпинделя и шлифовального круга уменьшает толщину сни-

маемого слоя по профилю зуба колеса и изменяет угол зацепления исходной режущей рейки. Деформация лент нарушает условие обкатки.

Величина деформации лент от сил инерции определяется по формуле

$$Y_l = \frac{F_j \cdot L'}{E_l \cdot F_l \cdot m}, \quad (21)$$

где F_j – сила инерции качающихся частей станка, кг; L' – длина ленты, см; E_l – модуль упругости, кг/см²; F_l – площадь поперечного сечения ленты, см²; m – число работающих лент с одной стороны, обычно $m = 2$.

В свою очередь, $Y = \frac{F_j}{K_l}$, где K_l – жесткость лент. Откуда $K_l = \frac{E_l \cdot F_l}{L'}$.

Подставляя значения $E_l = 2 \cdot 10^6$ кг/см²; $F_l = \delta \cdot b = 0,02 \cdot 2,7 = 0,054$ см²; $L' = 34$ см получим: для $\delta = 0,2$ мм $K_l = 317$ кг/мм; для $\delta = 0,3$ мм $K_l = 476$ кг/мм; для $\delta = 0,4$ мм $K_l = 635$ кг/мм. После подстановки экспериментального уравнения

$$(19) \text{ в формулу (21) получим } Y_{l \max} = 0,0135 \cdot l_{xc} \cdot n^2 \cdot \frac{L' \cdot J}{E_l F_l J_0 R_\rho^2}.$$

Расчетные формулы для определения деформации отдельных узлов станка выводились с некоторыми допущениями и они нуждаются в экспериментальном подтверждении. В связи с этим была поставлена серия опытов по определению жесткости узла шпинделя шлифовального круга, жесткости шлифовальных кругов, жесткости лент обкатки и по определению влияния угла наклона лент на величину ее деформации.

Жесткость шпиндельного узла зубошлифовального станка МААГ определялась в статических и динамических условиях. Нагрузка станка осуществлялась с помощью специального динамометра с проволочными датчиками сопротивления (рис. 6).

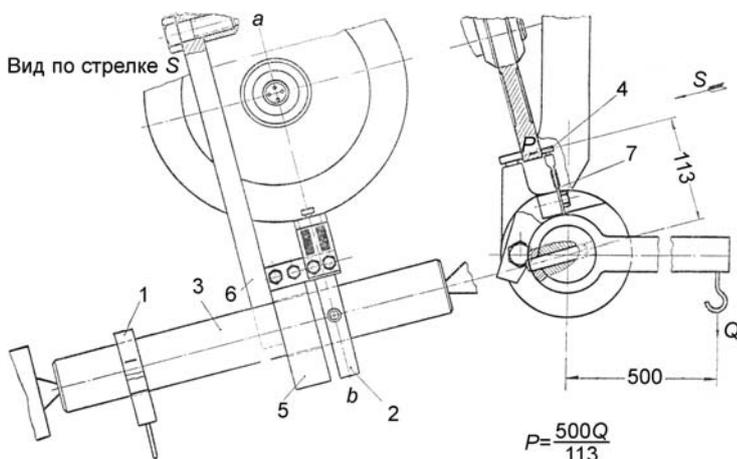


Рис. 6. Нагрузка станка с помощью специального динамометра с проволочными датчиками сопротивления.

Вместо шлифовального круга на шпиндель станка устанавливался жесткий диск, изготовленный с высокой точностью. На оправку 3, которая устанавливалась в центрах станка, одевались две втулки 2 и 5, и закреплялся нагрузочный рычаг 1 для подвески грузов. Втулка 2 жестко закреплялась с оправкой, а втулка 5, свободно сидящая на оправке, фиксировалась от проворота стальной планкой 6.

Упругая пластинка с проволочными датчиками сопротивления 7 одним концом крепилась болтами к втулке 5, а вторая через шарикоподшипник 4 прижималась с некоторым натягом к диску. Нагрузка создавалась рычагом нагру-

жения. Жесткость кругов осуществлялась путем последовательного нагружения и разгрузки круга у периферии грузами от 1 до 8 кг.

Литература: 1. Маталин А.А. Технология машиностроения: Учебник. – Л.: Машиностроение, Ленинград. Отделение, 1985. – 496 с. 2. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с. 3. Якимов А.В., Оборский Г.А., Якимов А.А. и др. Технология машиностроения. – Одесса: Астропринт, 2001. – 601 с. 4. Якимов А.А. Основы теории обеспечения и стабилизации качества поверхностного слоя при прерывистом шлифовании зубчатых колес. – Харьков, 1997. – 210 с. 5. Якимов О.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якимов О.О. Високопродуктивне шліфування: Навчальний посібник. – К.: ІСДО, 1996. – 180 с.

УДК 621.923

ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ ТЕМПЕРАТУРЫ ШЛИФОВАНИЯ

Рябенков И.А. (г. Харьков, Украина)

We made the calculation and analysis of grinding temperature and the depth of penetration of heat into the surface layer of the workpiece.

Шлифование является основным методом финишной обработки деталей машин, обеспечивающим высокие показатели точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей [1, 2]. Вместе с тем, как известно, шлифование характеризуется высокой теплонапряженностью процесса, что отрицательно сказывается на качестве обработки. В поверхностном слое детали формируются неблагоприятные растягивающие остаточные напряжения, снижается микротвердость, образуются прижоги и микротрещины. Повысить качество обработки при шлифовании можно уменьшением режимов резания, снижением трения круга с обрабатываемым материалом и т.д. [1]. Однако, при этом важно знать истинные причины роста температуры и появления температурных дефектов обработки, располагать аналитическими решениями о закономерностях формирования температуры шлифования. Поэтому целью работы является расчет и анализ температуры шлифования и глубины ее проникновения в поверхностный слой обрабатываемой детали.

Для определения температуры шлифования воспользуемся аналитической

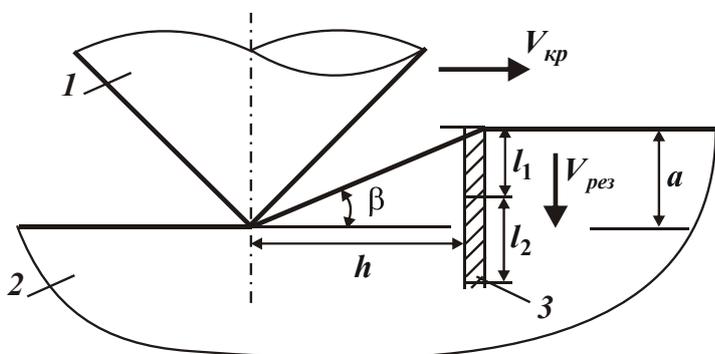


Рис. 1. Расчетная схема процесса микрорезания отдельным зерном: 1 – режущее зерно; 2 – обрабатываемый материал; 3 – адиабатический стержень.

зависимостью [3]: $\theta = \sigma \cdot z / c \cdot \rho$, где σ – условное напряжение резания, Н/м²; z – относительная величина температуры, 0...1; c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К); ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³. При микрорезании единичным зерном (рис. 1) относительная величина температуры z определяется из уравнения [4]:

$$\bar{l}_1 = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot a \cdot V_{рез} = -\ln(1-z) - z. \quad (1)$$

где $V_{рез} = \frac{a}{\tau_1} = a \cdot \frac{V_{кр}}{h} = V_{кр} \cdot \operatorname{tg} \beta$ – скорость перемещения теплового источника

вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали (скорость перерезания бесконечно тонкого адиабатического стержня, которыми условно представлен снимаемый припуск), м/с; τ_1 – время перерезания адиабатического стержня, с; h – длина зоны резания, охваченная плоскостью сдвига материала, м; β – условный угол сдвига обрабатываемого материала; a – толщина среза, м; $V_{кр}$ – скорость круга (скорость резания), м/с; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К; l_1 – длина перемещения теплового источника, м; l_2 – толщина поверхностного слоя детали, в котором концентрируется выделяющееся при резании тепло вследствие теплопроводности обрабатываемого материала, м.

Условия формирования температуры при шлифовании будут подчиняться более сложным закономерностям, чем при микрорезании единичным зерном. Отличия состоят, во-первых, в том, что режущие зерна при шлифовании контактируют не с “холодным“, а с “горячим” обрабатываемым материалом, нагретым ранее проработавшими зернами. Во-вторых, в том, что при шлифовании происходит трение связки круга с обрабатываемым материалом, а это является дополнительным источником теплообразования. Исходя из сказанного, могут быть предложены три принципиальных подхода к расчету температуры при шлифовании. Первым следует рассматривать подход, аналогичный подходу к расчету температуры микрорезания единичным зерном. Он предполагает контакт фиксированного режущего зерна с “холодным“ обрабатываемым материалом, нагрев которого от ранее проработавших зерен не учитывается. В этом случае расчет температуры при шлифовании производится на основе зависимости (1). Второй подход состоит в учете нагрева обрабатываемого материала от ранее проработавших зерен круга, что более полно отражает реальные условия обработки.

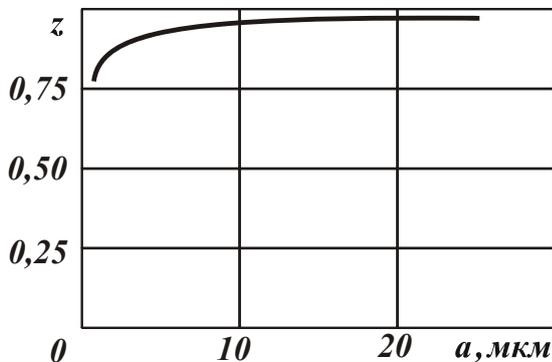


Рис. 2. Зависимость относительной величины температуры z от толщины среза a при микрорезании закаленной стали ШХ15 при $V_{кр} = 27,5$ м/с.

Третий подход связан с рассмотрением зоны шлифования в виде “пятна контакта” круга с обрабатываемым материалом, в пределах которого действует тепловой источник. В этом случае силовая напряженность процесса резания, обусловленная стружкообразованием и трением зерен и связки круга с обрабатываемым материалом, учитывается обобщенно с помощью таких показателей как мощность и плотность теплового потока. Данный подход позволяет определить среднюю температуру при

шлифовании. Для оценки возможностей практического использования каждого из указанных подходов, проведем их детальный анализ.

1. Первый подход, как отмечалось выше, предполагает расчет температуры при шлифовании на основе зависимости (1), рассматривая в последней в качестве параметра a максимальную толщину среза отдельным зерном круга, которая, например, для плоского шлифования периферией алмазного круга с долевой продольной подачей, равной единице, описывается зависимостью [5]:

$$H_{max} = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t} \cdot (1-\eta)^2}{tg\gamma \cdot m \cdot V_{кр} \cdot \sqrt{R_{кр}} \cdot (1+\eta)}}, \quad (2)$$

где \bar{X} – зернистость круга, м; m – объемная концентрация зерен в круге (для 100%-ной концентрации круга $m=100$); γ – половина угла при вершине конусообразного режущего зерна; $V_{дет}$, $V_{кр}$ – соответственно скорости детали и круга, м/с; t – глубина шлифования, м; $R_{кр}$ – радиус круга, м; η – безразмерный параметр, учитывающий степень затупления зерен круга ($\eta \rightarrow 0$ – для острого зерна, $\eta \rightarrow 1$ – для затупленного зерна).

Тогда зависимость (1) при условии $a = H_{max}$ примет вид:

$$\bar{l}_1 = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t} \cdot (1-\eta)^2}{tg\gamma \cdot m \cdot V_{кр} \cdot \sqrt{R_{кр}} \cdot (1+\eta)}} \cdot V_{кр} \cdot tg\beta = -\ln(1-z) - z. \quad (3)$$

Из зависимости (3) следует, что увеличение относительной величины температуры z происходит в результате увеличения параметров $V_{дет}$, $V_{кр}$, t , \bar{X} и уменьшения m . Расчетами установлено, что при $a = H_{max} < 5$ мкм имеет место увеличение z с увеличением H_{max} , а при $H_{max} > 5$ мкм величина z фактически остается постоянной в связи с реализацией установившегося теплового процесса при шлифовании ($z \rightarrow 1$), рис. 2 [4].

2. Допуская, что остывание обрабатываемого материала в период между работой двух соседних зерен не происходит, при втором подходе задачу определения температуры шлифования можно упростить. Она сводится к схеме среза всего адиабатического стержня одним условным зерном со скоростью $V_{рез} = V_{кр} \cdot tg\beta$ с толщиной среза $H_{max} = t$. Тогда зависимость (1) примет вид:

$$\bar{l}_1 = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot t \cdot V_{кр} \cdot tg\beta = -\ln(1-z) - z. \quad (4)$$

Очевидно, величина z , рассчитанная по зависимости (4), больше рассчитанной по зависимости (3).

Несомненно, в реальных условиях шлифования имеет место остывание обрабатываемого материала в период между работой двух соседних зерен. Чем меньше толщина среза H_{max} и больше период времени между контактом двух соседних зерен, тем выше степень остывания обрабатываемого материала и меньше температура. Поэтому эффективно уменьшать толщину среза H_{max} за счет уменьшения $V_{дет}$, \bar{X} и увеличения m . Увеличение скорости круга $V_{кр}$

также приведет к уменьшению H_{max} , однако при этом необходимо учитывать то, что $V_{кр}$ самостоятельно входит в зависимость (4) и ее увеличение ведет к увеличению z .

3. Для определения температуры при шлифовании в соответствии с третьим подходом можно воспользоваться известным решением [3]:

$$\bar{l}_1 = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot t \cdot V_{dem} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{кр}}} = -\ln(1-z) - z. \quad (5)$$

Сравнивая аналогичные зависимости (4) и (5), видно, что они отличаются двумя входящими в них параметрами. Зависимость (5) содержит произведение параметров $V_{dem} \cdot \sqrt{t / 2R_{кр}}$, а зависимость (4) – произведение параметров $V_{кр} \cdot tg\beta$. Очевидно, $V_{кр} \gg V_{dem}$, а $tg\beta > \sqrt{t / 2R_{кр}}$. Поэтому значения z , рассчитанные по зависимости (4) будут больше значений z , рассчитанных по зависимости (5).

Определим толщину l_2 поверхностного слоя обрабатываемой детали, в котором концентрируется выделяющееся при резании тепло. Согласно первому и второму подходам к расчету температуры при шлифовании, имеем:

$$l_2 = H_{max} \cdot \frac{z}{\bar{l}_1}; \quad l_2 = t \cdot \frac{z}{\bar{l}_1}. \quad (6)$$

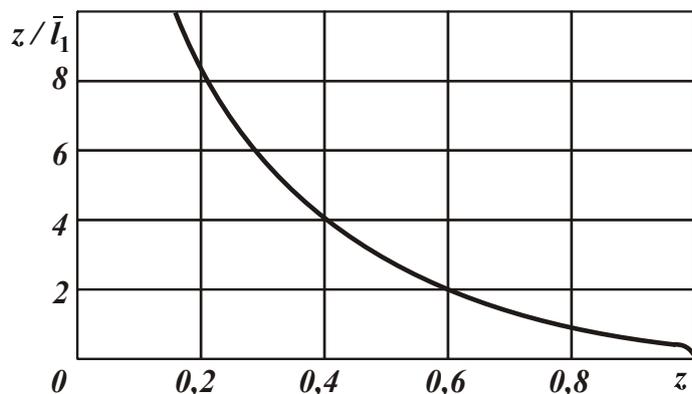


Рис. 3. Зависимость z/\bar{l}_1 от z .

Вследствие больших значений $z \rightarrow 1$ и соответственно небольших значений отношения z/\bar{l}_1 (рис. 3), параметр l_2 будет принимать небольшие значения. При третьем подходе к расчету температуры при шлифовании параметр l_2 определяется зависимостью $l_2 = t \cdot z/\bar{l}_1$ и, как установлено расчетами, принимает относительно большие значения,

превышающие глубину шлифования t , т.к. $z < 0,5$, а $z/\bar{l}_1 \gg 1$ (рис. 3) для всего возможного диапазона изменения глубины шлифования t и скорости детали V_{dem} в соответствии с зависимостью (5). Этим показано, что увеличенные значения параметра l_2 достигаются при наличии трения связки круга с обрабатываемым материалом. В противном случае, т.е. при первом и втором подходах, параметр l_2 принимает небольшие значения, соизмеримые с толщиной среза H_{max} . Следовательно, существенно уменьшить параметр l_2 и соответственно снизить вероятность появления различных дефектов на обработанных поверхностях, обусловленных температурным фактором, можно за счет уменьшения или исключения трения связки с обрабатываемым материалом. Из этого вытекает, что параметр l_2 при шлифовании формируется в основном в результате

действия силы трения круга с обрабатываемым материалом.

В научно-технической литературе приведен большой объем результатов экспериментальных исследований температуры при шлифовании и распределения остаточных напряжений и микротвердости по глубине обработанного поверхностного слоя детали [1, 2, 3]. Их анализ показывает, что глубина проникновения температуры в поверхностный слой многократно превышает глубину шлифования, т.е. параметр l_2 значительно больше глубины шлифования. Это хорошо согласуется с приведенными выше теоретическими решениями и указывает на то, что формирование параметра l_2 , так же как и температуры шлифования происходит в основном под воздействием силы трения круга с обрабатываемым материалом.

Литература: 1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. 2. Синтетические алмазы в машиностроении / Под ред. В.Н. Бакуля. – К.: Наук. думка, 1976. – 351 с. 3. Новиков Ф.В., Яценко С.М. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов // Труды 13-й Международной научно-технической конференции. Физические и компьютерные технологии. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2007. – С. 8-20. 4. Новиков Ф.В., Рябенков И.А. Теоретический анализ условий повышения качества обработки по температурному критерию // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Х.: ХНТУСГ. – 2007. – Вип. 61. – С. 164-171. 5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.1. “Механика резания материалов” – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.

УДК 621.02.001.63

ПЛАНЕТАРНАЯ ОБРАБОТКА ОТВЕРСТИЯ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ

Зубкова О.С., канд. техн. наук., **Фадеев А.А.** (Курск, Россия)

The problems of the kinematics of the planetary milling, processing holes zerovaniem.

Фрезерование деталей инструментом с планетарным движением (ИПД) имеет большие технологические возможности, позволяющие обрабатывать одним инструментом отверстия в определенном диапазоне диаметров [1]. Прерывистое резание, характерное для данного вида обработки, обеспечивает стружколомание и предотвращает скопление стружки в труднодоступных местах, что особенно важно при обработке коррозионно-стойких сталей.

При описании работы ИПД воспользуемся общепринятыми условными обозначениями. Вращение инструмента вокруг своей оси (оси инструмента) обозначим через D_{f*1} (рис. 1) – главное движение резания. Планетарное движение инструмента по контуру обрабатываемого отверстия – $D_{\Sigma*1}$ (движение по образующей (E) формируемой поверхности). Перемещение в осевом направлении – D_{S*1} (движение по направляющей (F) формируемой поверхности). Планетарное движение осуществляется относительно оси смещения. Возможна обработка инструментом двумя способами: планетарное движение ИПД по направлению D_{f*1} и планетарное движение против D_{f*1} .

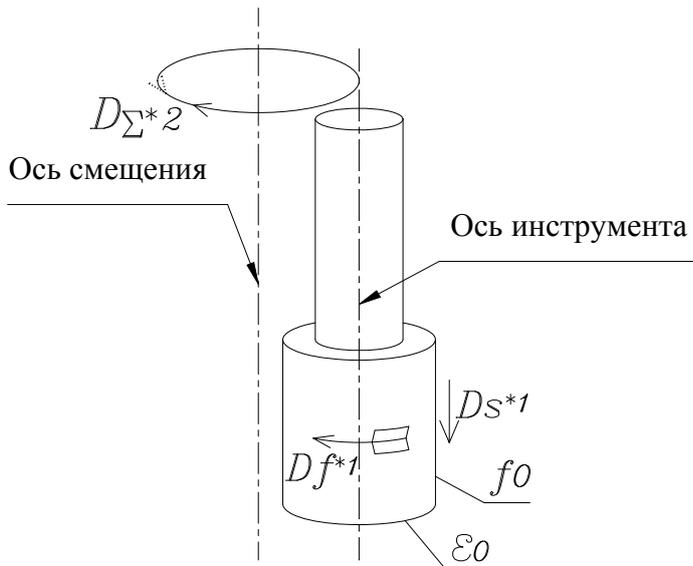


Рис. 1. Схема работы ИПД.

В работе [1] сделан вывод о том, что потенциально процесс фрезерования более производительен, так как в процессе резания участвует число зубьев $z > 1$. Кроме того, можно дополнительно увеличить производительность фрезерования за счет увеличения скорости фрезерования. Это возможно, так как при фрезеровании, в отличие от долбления, меньше температура нагрева зубьев фрезы в связи с периодичностью процесса резания.

Данный способ фрезерования нашел применение при предварительной обработке гранных отверстий (рис. 2, а). Съем припуска на участках 1 производится с помощью протягивания. Обработка участка 2 позволяет уменьшить припуск снимаемый притягиванием.

Обработка этого участка возможна с помощью операций долбления и фрезерования. Данные способы вначале оценим с позиции производительности.

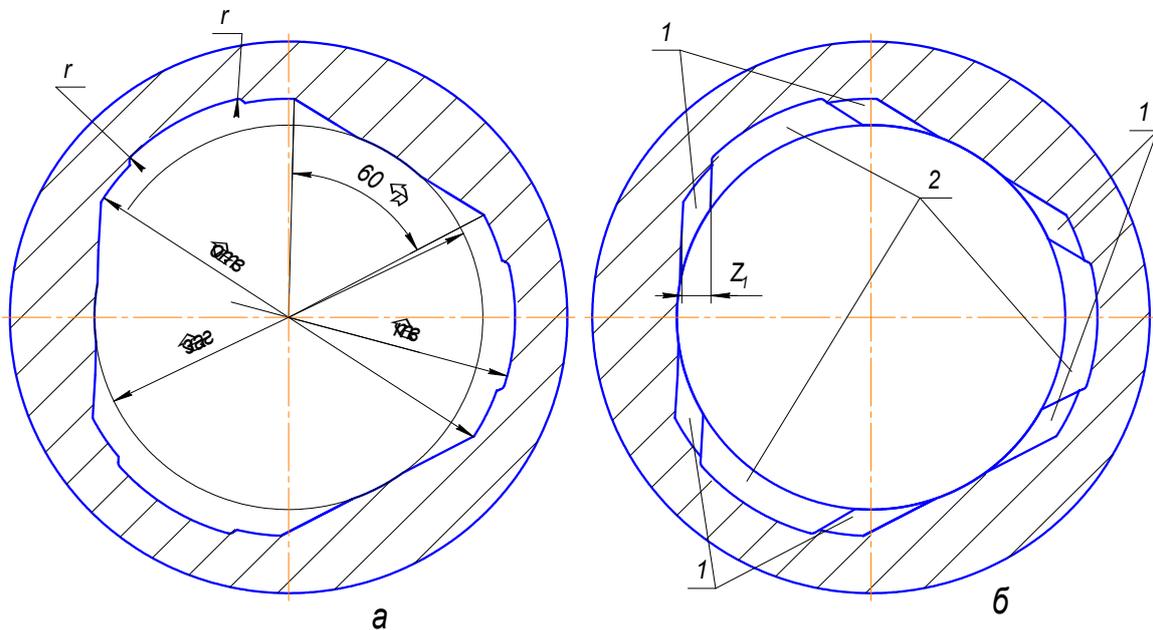


Рис. 2. Схема работы ИПД.

Также обработка фрезерованием позволит получить выходные параметры обработки близкие к заданным и сократить время последующей доводки. Очень часто этот метод является единственным возможным методом, это особенно важно на данный момент, так как большинство предприятий машиностроения перешли на серийное или мелкосерийное производство. Получение деталей фрезерованием, при таком типе производства, наиболее экономически оправдано.

Литература: 1. Гречишников В.А., Артюхин Л.Л., Сергеев Д.Г. Моделирование и анализ процесса обработки деталей инструментом с планетарным движением // Вестник машиностроения, 1999, № 11. – С. 39-41.

УДК 515.2:518

РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ CAD/CAM СИСТЕМ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Гуцаленко Ю.Г. (г. Харьков, Украина), **Кривошея А.В.**, канд. техн. наук (г. Киев, Украина), **Фадеев В.А.**, докт. техн. наук (г. Харьков, Украина)

Realized in 2008-2009 Research scientific work M2233 «Creation of theory of unified multiparametric information database for CAD/CAM systems of gearing, tools and gear processing» (government registration № 0108U001445), planned by Ministry of Education and Science of Ukraine, is presented.

Современное машиностроение характеризуется высокими требованиями к техническому уровню и качеству машин, необходимостью сокращения сроков конструкторско-технологической подготовки производства и повышения его гибкости с обострением конкуренции в условиях глобализации отраслевого товарного рынка.

Прогнозирование перспективных тенденций и инвестиционную политику оптимального развития промышленности и составляющего ее основание машиностроения принято соотносить со сменой и развитием экономических укладов, определяемых совокупностью технологий, отличающих экономику промышленно развитых стран. Ведущие мировые экономики сегодня переживают пятый технологический уклад, среди основных определителей которого массовое распространение информационных технологий, вычислительная техника, программное обеспечение, в машиностроении – автоматизированные комплексы многокоординатной обработки деталей [1].

За последние 10-15 лет в мировом станкостроении произошли принципиальные изменения в конструировании оборудования. Новые приводы, шариковые винтовые пары, линейные электродвигатели, двигатели постоянного тока с регулируемым крутящим моментом, постоянно совершенствующиеся системы ЧПУ на базе микропроцессорной техники привели к тому, что компоновка станков подчиняется функциональным задачам оборудования и более не зависит от сложности встраивания кинематических цепей, функции которых берет на себя компьютерное управление высокоточными приводами. Развитие станкостроения актуализирует прикладные разработки информационного, алгоритмического и программного обеспечения для совместного, неразрывно CAE/CAD/CAM/CAQ связанного компьютеризированного интегрированного производства (СІМ), одновременного повышения тем самым культуры и функциональной результативности моделирования, проектирования и производства объектов, инструментов и процессов обработки [2, 3, 4], что особенно важно для сложнопрофильного формообразования [5], характерного зубчатым зацеплениям, зубообрабатывающим инструментам и процессам зубообработки.

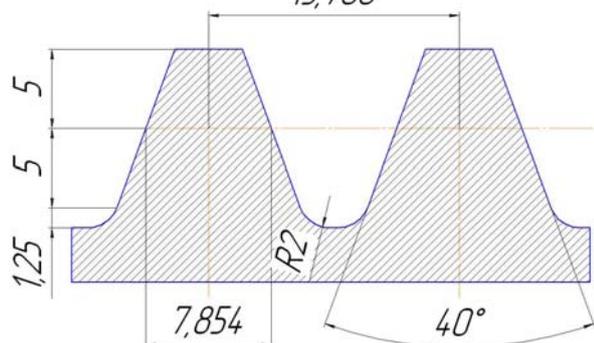
Принятый в научно-технической школе физики процессов резания материалов НТУ «ХПИ» унифицированный подход к теоретическим и практическим разработкам объектов, инструментов и процессов обработки, основанный Б.А. Перепелицей на многопараметрических аффинных отображениях пространства [6], позволяет на единой математической элементной платформе рассматривать различные кинематико-геометрические аспекты и взаимосвязи на протяжении всего жизненного цикла продукции. Такой подход и опыт его последовательной теоретической и практической реализации при выполнении НТУ «ХПИ» по плану Министерства образования и науки Украины в 2008-2009 гг. НИР М2233 «Создание теории унифицированной многопараметрической информационной базы для CAD/CAM систем зубчатых зацеплений, инструментов и процессов зубообработки» (государственная регистрация № 0108U001445) солидаризуется с трендовым доминированием в промышленно развитых странах мира так называемых CALS-технологий, ассоциируемых с парадигмой использования единого информационного пространства (интегрированной информационной среды) на основе международных стандартов для единообразного информационного взаимодействия всех участников жизненного цикла продукции: разработчиков, заказчиков и поставщиков, эксплуатируемого и ремонтного персонала [7,8].

Актуальность выполнения НИР М2233 для машиностроительно ориентированных научно-исследовательских организаций, промышленных предприятий и учебных заведений высшей школы определена в 2007 г. подготовленными под руководством д-ра техн. наук Б.А. Перепелицы ее проектными заданиями, в разработке которых наряду с НТУ «ХПИ» представлены НТУУ «КПИ» (чл.-кор. НАН Украины П.Р. Родин), Украинская государственная академия железнодорожного транспорта Министерства транспорта и связи Украины (д-р техн. наук Е.Б.Кондусова), Институт сверхтвердых материалов НАН Украины (канд. техн. наук А.В. Кривошея), Институт машин и систем НАН и Минпромполитики Украины (д-р техн. наук Н.Э. Тернюк), Научно-исследовательский техноцентр специальных технологий (канд. техн. наук Р.В. Ковалюх).

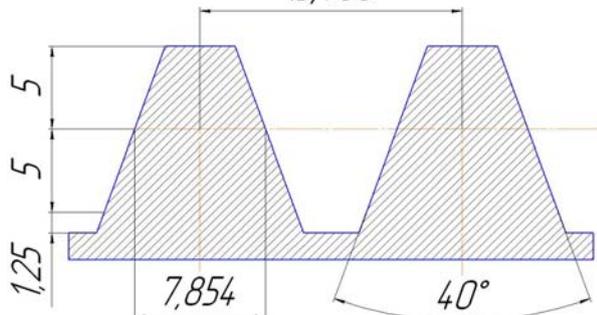
В ходе выполнения НИР М2233 совместно с Институтом сверхтвердых материалов НАН Украины (вед. науч. сотр. А.В. Кривошея) разработаны систематизированные информационные банки данных зубопрофилирования: кинематических линий и переходных поверхностей, исходных контуров, формообразующих тел, заготовок, кинематических схем формообразования. Элементная база банков данных представлена математическими обобщениями в унифицированных структурах параметров и операторов многопараметрических отображений пространства зубопрофилирования (рис. 1, 2).

Создание информационных баз в концепции CAD/CAD систем многономенклатурного гибкого производства зубчатых колес разных классов, видов и типов, в том числе для двухпараметрических и смешанных зубчатых передач с эвольвентным и неэвольвентным зацеплением, потребовало специальных расширений стандартных и оригинальных средств соответствующей алгоритмической и программной поддержки. Такие согласующиеся разработки выполнены в НТУ «ХПИ» и ИСМ НАН Украины.

ГОСТ 13755-68
 $\alpha_d = 20^\circ$; $\rho_u = 0,40m$; $f_0 = 1,0$; $c_0 = 0,25$
 15,708

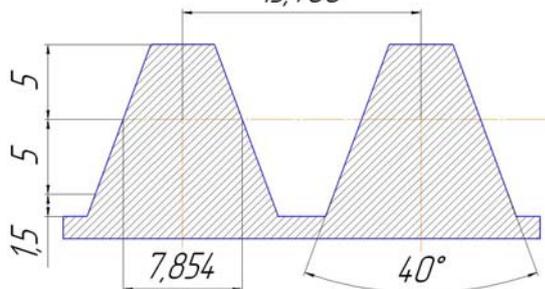


445-1957; NEN 1629-1959;
 PN-58M88503; AGMA 1958
 $\alpha_d = 20^\circ$; $f_0 = 1,0$; $c_0 = 0,25$
 15,708

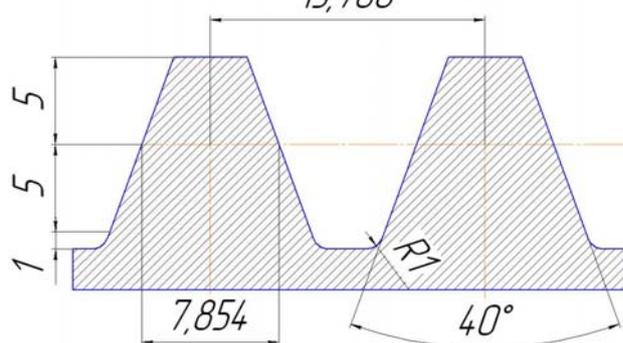


DIN 867

$\alpha_d = 20^\circ$; $f_0 = 1,0$; $c_0 = 0,3$
 15,708

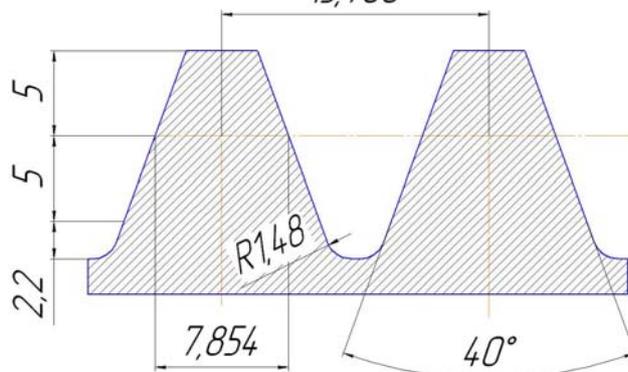


ГОСТ 13754-68
 $\alpha_d = 20^\circ$; $\rho_u = 0,20m$; $f_0 = 1,0$; $c_0 = 0,2$
 15,708



BBS 436/1932

$\alpha_d = 20^\circ$; $\rho_u = 0,295m$; $f_0 = 1,0$; $c_0 = 0,44$
 15,708



DIN 867

$\alpha_d = 15^\circ$; $f_0 = 1,0$; $c_0 = 0,2$
 15,708

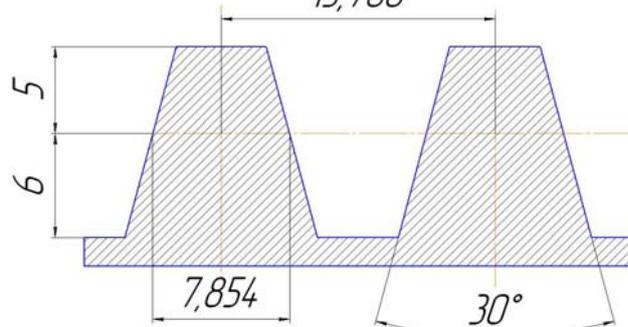
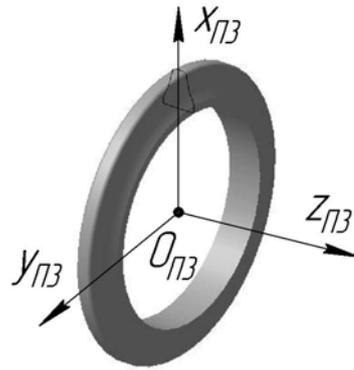
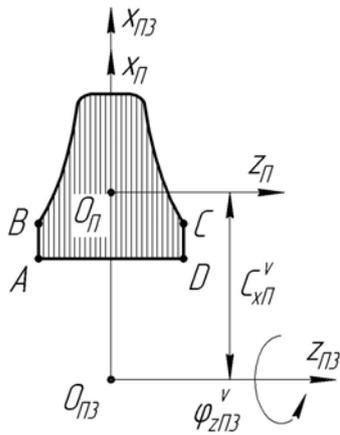


Рис. 1. Примеры представления исходных контуров в системах отечественных и зарубежных стандартов.

В НТУ «ХПИ» создан оригинальный комплекс модулей для проведения вычислительных экспериментов и получения визуальных отображений проверки прямых, обращенных движений и характеристик огибания, совокупность которых ответственна за точность формообразования зубчатого венца.

Программное обеспечение разработанного в НТУ «ХПИ» комплекса модулей геометрического моделирования объектов, инструментов и процессов зубообрабатывающего эвольвентного и неэвольвентного формообразования, основанных на их систематизации и многопараметрических отображениях, состоит из прикладных программ независимого решения частных задач и головной

программы, обеспечивающей согласованность решений частных задач, необходимую совместимость условий рабочего и производящего зацеплений.

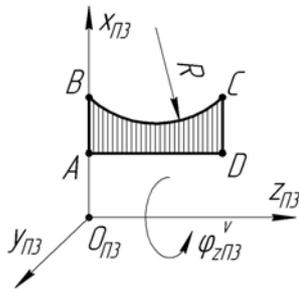


а

$$m_{rП} = m_{r[AB]} \cup m_{r[BC]} \cup m_{r[CD]} \cup m_{r[DA]},$$

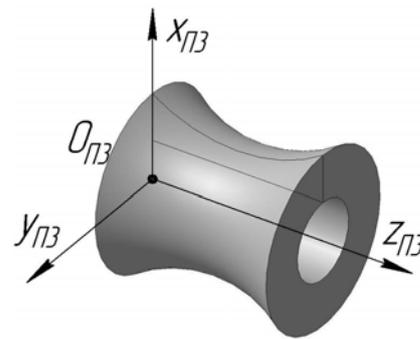
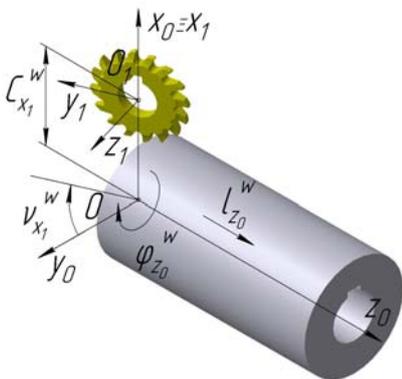
$m_{rП}$ – матричное уравнение производящего профиля

Схема задания поверхности заготовки глобоидного зубчатого колеса



$$m_{rП} = m_{r[AB]} \cup m_{r[BC]} \cup m_{r[CD]} \cup m_{r[DA]}$$

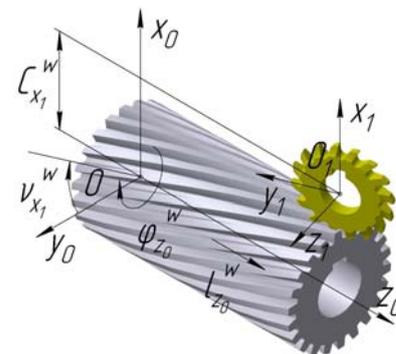
Схема формообразования косозубого цилиндрического зубчатого колеса дисковой фрезой



б

$$m_{rПЗ} = m_{\varphi_{zПЗ}^v} m_{rП}, \quad 0 \leq \varphi_{zПЗ}^v \leq 2\pi$$

$m_{rПЗ}$ – матричное уравнение поверхности кольцевого производящего зубчатого венца



в

$$m_{r\partial 0 I / Д} = m_{\varphi_{z0}^w} m_{\varphi_{z1}^w} \cdot m_{v_{x1}^w} m_{c_{x1}^w} \cdot m_{rП1},$$

$$v_{x1}^w = 70^\circ, \quad l_{z0}^w = K\varphi_{z0}^w$$

Рис. 2. Примеры представления элементарных отображений в разработанных банках исходных формообразующих тел (а), исходных формообразуемых тел (б); кинематических схем формообразования (в).

Расчетно-графический комплекс модулей для проектирования
зубчатых зацеплений

Модуль	Применение для моделирования в зубообработке			Целевая функция	Математическое ядро	Средство разработки программного обеспечения	Форма представления входной информации	Форма представления выходной информации
	детали	инструмента	кинматики					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Invo-lute	+	-	-	Расчет боковой поверхности зуба в нормальном сечении	Синтез известных расчетов в единый профилирующий комплекс	Delphi	Модуль, число зубьев, начальный угол тип боковой поверхности	Таблица 2D массивов координат и ее графическое представление
Profil	-	+	-	Расчет профиля инструмента в нормальном сечении	Собственная разработка на базе теории отображений	Fortran	Выходная информация модуля Inolute, тип и параметры инструмента	Таблица 2D массивов координат профиля инструмента в нормальном сечении
Krom-ka	-	+	-	Визуализация инструмента	Разработка Института прикладной математики АН СССР им. М.В.Келдыша	Grafor	Выходная информация модуля Profil	Представление инструмента в векторной графике
Helix	-	-	+	Расчет эквидистантных линий зубьев	Собственная разработка на базе теории отображений	C++, Csape	Геометрические и техн. параметры колеса	Таблица 3D массивов координат линий зубьев
Spiral Surface	-	-	+	Визуализация эквидистантных линий зубьев	Использование библиотеки алгоритмического языка	C++, Csape	Выходная информация модуля Helix	Отображение эквидистантных линий на заданной начальной поверхности

Zub	+	-	-	Визуализация боковых поверхностей зубьев вдоль эквидистантных линий	Собственная разработка на базе теории отображений	Delphi	Выходная информация модуля Helix, Kromka, Spiral Surface	Отображение боковых поверхностей зубьев на заданной начальной поверхности
-----	---	---	---	---------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------	--------	----------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------

Программный комплекс применим на различных этапах жизненного цикла объектов и инструментов зубообработки (конструирование, производство, контроль в изготовлении и эксплуатации, выбраковка). Он может использоваться как для проверочных расчетов применимости серийно выпускаемого инструмента в конкретных задачах зубообработки, так и для производства расчетов и визуализации геометрии специального инструмента в случае невозможности применения серийного инструмента.

Комплекс (таблица) построен по открытому принципу и может пополняться новыми модулями (программами) и внутренними модулями (подпрограммами), а ранее разработанные модули бесконфликтно заменяются более совершенными. Это позволяет максимально эффективно эксплуатировать весь комплекс по мере усовершенствования отдельных расчетных методик и их пополнения, разработки соответствующего совместимого программного обеспечения.

Общая идея реализованных в комплексе модульных подходов к алгоритмическим и программным решениям задач профилирования в зубообработке на основе их типизации специально адаптированной к формообразованию резанием системы унифицированных параметров и пространственных отображений принадлежит проф. Б.А. Перепелице. В разработке комплекса принимали участие ст. науч. сотр. Ю.Г. Гуцаленко (концепция общей структуры системного представления модулей), ассистент, канд. техн. наук А.Л. Мироненко (постановка отдельных задач, концепция внутримодульного конструирования и внутримодульной интеграции), ст. преподаватель Т.Е. Третьяк (разработка блок-схемных и программных модульных решений). В НТУ «ХПИ» комплекс используется с рабочим названием АЛМТЕТ, аббревиатура которого сочетает инициалы разработчиков структур отдельных модулей.

Результаты работы программных модулей комплекса выдаются для пополнения CAD/CAM баз данных, анализа и принятия конструкторско-технологических решений в табличной и графической формах.

Выполненная разработка теории унифицированной многопараметрической информационной базы для CAD/CAM систем зубчатых зацеплений, инструментов и процессов зубообработки позволяет достигать любой заданной расчетной точности, сократить трудоемкость и повысить уровень теоретического обоснования и эффективности решаемых проектно-конструкторских задач.

Литература: 1. Боровский Г.В. Инструментальное производство в России – М.: ВНИИ-инструмент, 2008. – 160 с. 2. Весткемпер Э. Новая идеология CIM // Резание и инструмент. – Вып.47. – Харьков: ХПИ, 1993. – С. 33-45. 3. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). – СПб.:

Питер, 2004. – 560 с. 4. Westkamper E., Freese J. Integrated Concepts for Innovative Product and Production Development: In IX Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems: Karpacz, Poland, March 22-27. – Breslau, 1998. – SS. 259-267. 5. Грабченко А.И. 3D-моделирование инструментов, формообразования и съема припуска при обработке резанием /А.И.Грабченко, Е.Б.Кондусова, А.В.Кривошея, Н.С.Равская, П.Р.Родин. Под ред. П.Р.Родина. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2001. – 304 с. 6. Перепелица Б.А. Отображения аффинного пространства в теории формообразования поверхностей резанием. – Х.: Вища шк., 1981. – 152 с. 7. Конструкторско-технологическая информатика – 2000: Труды конгресса. В 2-х т. / IV междунар. конгресс [посвящ. 75-летию Моск. гос. технолог. ун-та «СТАНКИН» Пред. редкол. Ю.М. Соломенцев] – М.: Изд-во «Станкин», 2000. – ISBN 5-7028-0117-2. 8. Managing Nano-Bio-Info-Cogno Innovations: Converging Technologies in Society / Ed. by William Sims Bainbridge and Mihail C. Roco. – Dordrecht, Netherlands: Springer, 2005. – 398 p.

УДК 621.923

АБРАЗИВНО-ШЛИФОВАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА С ПРИМЕНЕНИЕМ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

Дудин А.Т. (г. Евпатория, Украина)

We propose new design solutions for the implementation of the vibrational motions of the terms of the grinding.

Применение ультразвуковых колебаний вращающихся шлифовальных кругов от пьезоэлектрических элементов и с использованием магнитострикционных преобразователей – это новый качественный уровень процесса шлифования [1-3]. Однако, при шлифовании пластичных и вязких материалов амплитуды колебаний шлифовального круга может быть недостаточно для эффективного ведения процесса. Механический способ перемещения круга эксцентриком не позволяет достичь высокой частоты колебаний. Поэтому при шлифовании пластичных и вязких материалов возникает необходимость создания эффективного устройства для перемещения вращающегося круга с большой частотой и амплитудой. Для этого можно использовать эффект гидравлического удара при электрическом разряде в жидкости. Рассмотрим схему, показанную на рис. 1.

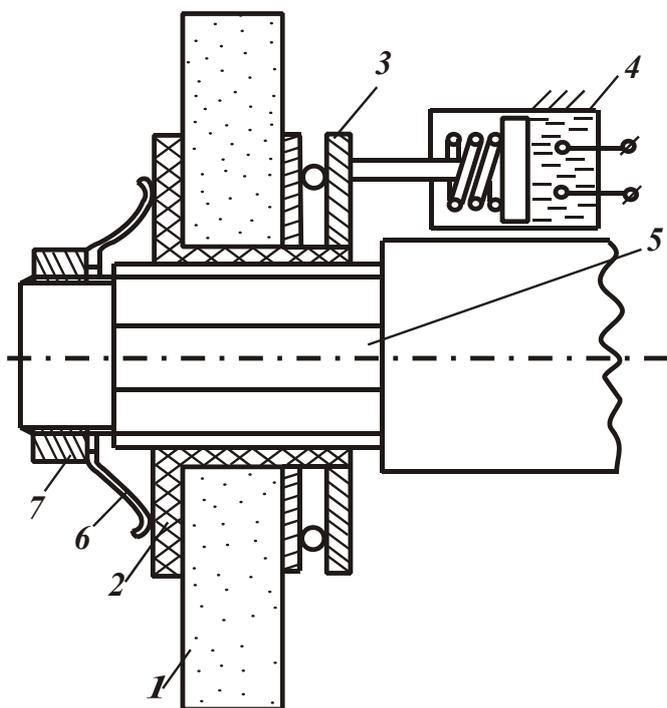


Рис. 1. Устройство для абразивно-шлифовальной обработки с перемещением круга гидроударами от электрических разрядов: 1 – круг; 2 – шлицевая втулка; 3 – подшипник; 4 – гидравлический цилиндр с поршнем-штоком, возвратной пружиной, электродами для гидравлического удара; 5 – шлицевый вал; 6 – пружина; 7 – гайка.

Механический способ перемещения круга эксцентриком не позволяет достичь высокой частоты колебаний. Поэтому при шлифовании пластичных и вязких материалов возникает необходимость создания эффективного устройства для перемещения вращающегося круга с большой частотой и амплитудой. Для этого можно использовать эффект гидравлического удара при электрическом разряде в жидкости. Рассмотрим схему, показанную на рис. 1.

При электрическом разряде на электродах, которые находятся

в жидкости, в цилиндре происходит гидравлический удар. Жидкость в цилиндре расширяется и перемещает поршень-шток, который в свою очередь перемещает круг. Пружина 6 возвращает поршень и шлифовальный круг в исходное положение. Таким образом цикл повторяется.

Перемещение круга в направлении пружины 6 жесткое. Это позволяет более эффективно производить обработку вязких материалов. Амплитуда колебаний круга зависит от величины электрического напряжения, подаваемого на электроды для электрического разряда, а частота колебаний – от частоты подаваемых импульсов на электроды. Поэтому, используя данное устройство, достаточно просто выбрать оптимальный режим обработки практически любого пластичного и вязкого материалов. Система может работать в “мягком” режиме с неопределенной амплитудой, если между подшипником 3 и штоком гидроцилиндра поместить пружину, т.е. колебания на круг будут подаваться через пружину.

Система перемещения вращающегося круга гидравлическими ударами может работать совместно с механической, пьезокристаллической и магнито-стрикционной системами (рис. 2 и рис. 3).

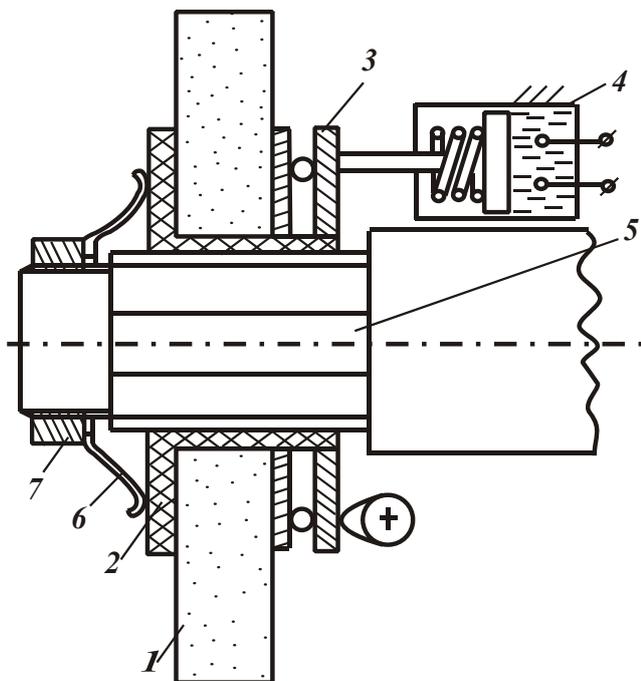


Рис. 2. Устройство для абразивно-шлифовальной обработки с перемещением круга гидравлическими ударами от электрических разрядов с механическими перемещениями эксцентриком: 1 – круг; 2 – шлицевая втулка; 3 – подшипник; 4 - гидравлический цилиндр с поршнем-штоком, возвратной пружиной, электродами для гидравлического удара; 5 – шлицевый вал; 6 – пружина; 7 – гайка; 8 – эксцентрик.

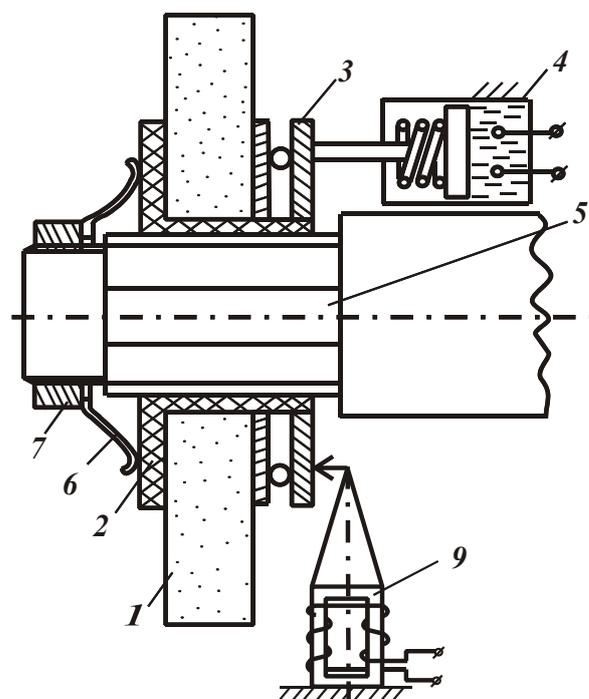


Рис. 3. Устройство для абразивно-шлифовальной обработки с перемещением круга гидравлическими ударами от электрических разрядов с магнито-стрикционной колебательной системой: 1 – круг; 2 – шлицевая втулка; 3 – подшипник; 4 - гидравлический цилиндр с поршнем-штоком, возвратной пружиной, электродами для гидравлического удара; 5 – шлицевый вал; 6 – пружина; 7 – гайка; 8 – эксцентрик; 9 – магнито-стрикционная колебательная система.

Система может успешно использоваться совместно с пьезоэлектрическими элементами, обеспечивающими перемещение круга, а так же осуществляющими контроль за его состоянием и перемещением по обрабатываемой поверхности. Таким образом, применяя новые принципы и методы колебательных перемещений вращающихся кругов, можно повысить эффективность абразивно-шлифовальной обработки.

Рассмотрим схему устройства для абразивно-шлифовальной обработки с перемещением круга гидравлическими ударами от электрических разрядов (рис. 4).

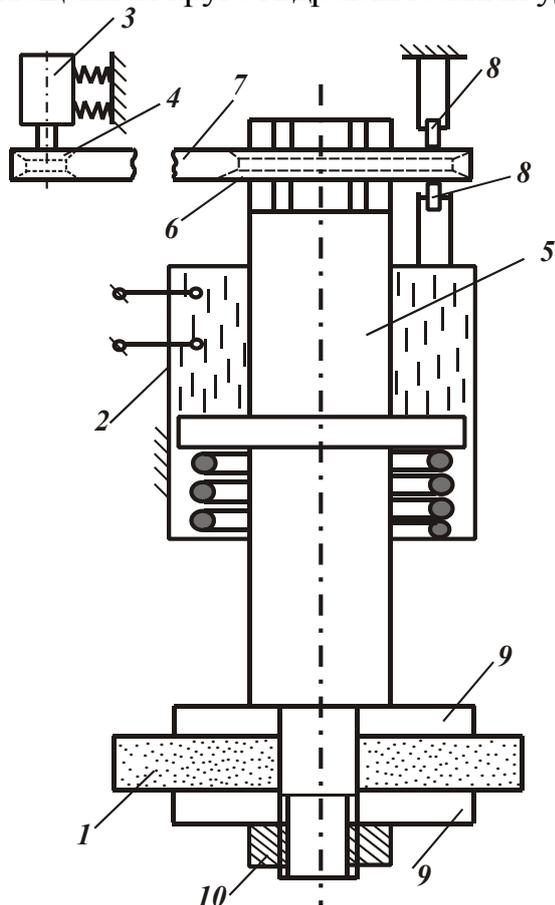


Рис. 4. Устройство для абразивно-шлифовальной обработки с перемещением круга гидравлическими ударами от электрических разрядов: 1 – круг; 2 – гидравлический цилиндр со шлицевым валом, передающим вращение круга, поршнем, возвратной пружиной, электродами; 3 – электродвигатель; 4 – шкив ведущий; 5 – шлицевый вал с поршнем, передающий вращение на шлифовальный круг; 6 – шкив ведомый со шлицами; 7 – ремень клиновой; 8 – ролики, фиксирующие шкив; 9 – шайбы; 10 – гайка.

Круг 1 крепится жестко с помощью шайб 9 и гайки 10 на передающем вращение шлицевом вале с поршнем 5, который проходит через гидроцилиндр 2, разделенный поршнем вала 5 на две камеры. В камере со стороны круга находится возвратная пружина. Смежная камера заливается диэлектрической

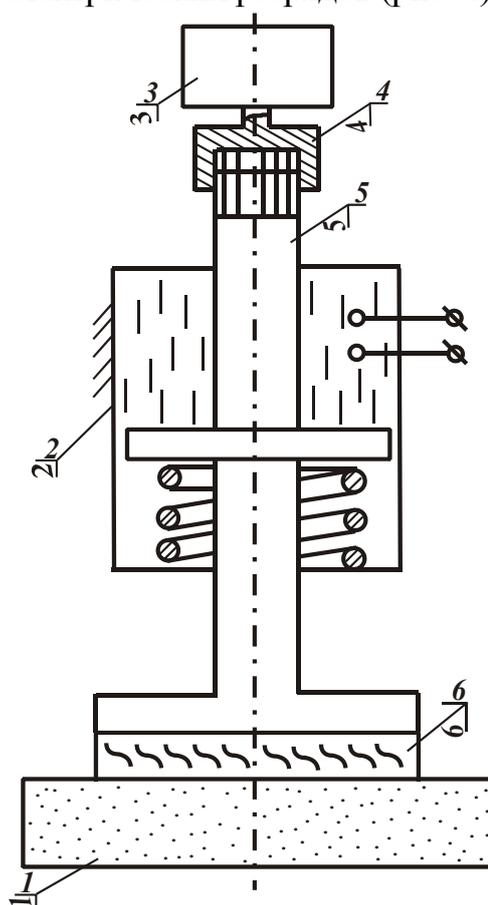


Рис. 5. Устройство абразивно-шлифовальной обработки с перемещением круга гидравлическими ударами от электрических разрядов: 1 – круг; 2 – гидравлический цилиндр со шлицевым валом, передающим вращение на круг, поршнем, возвратной пружиной и электродами; 3 – электродвигатель; 4 – шлицевая муфта; 5 – шлицевый вал с поршнем, передающий вращение на шлифовальный круг; 6 – пьезоэлектрический диск.

жидкостью. В камере установлены электроды для проведения электрических разрядов. На шлицевой конец вала 5 установлен шлицевой шкив 6, который от смещения фиксируется опорами с роликами 8. Шкив 6 соединяется с шкивом 4 (установленным на вал электродвигателя 3) клиновым ремнем 7. При включении электродвигателя 3, вращение посредством ременной передачи 7 передается со шкива 4 на шкив 6, а через шкив 6 получает вращение вал 5. На валу 5 закреплен круг 1, который совершает вращательное движение и возвратно-поступательное перемещение в направлении оси вала 5. Перемещение круга происходит за счет гидравлических ударов от электрического разряда между электродами. На электроды подается импульс высокого напряжения, в результате происходит гидравлический удар, жидкость увеличивается в объеме и от давления на поршень вал 5 с кругом 1 перемещается по обрабатываемой поверхности. После гидравлического удара круг 1 с помощью возвратной пружины занимает исходное положение. Вал 5 перемещается по шлицам в шлицевом шкиве 6. Таким образом, цикл повторяется. Частота перемещений круга 1 зависит от частоты подачи импульсов на электроды.

Принцип работы устройства абразивно-шлифовальной обработки с перемещением круга гидравлическими ударами от электрических разрядов, показанного на рис. 5, аналогичен работе устройства, показанного на рис. 4. Отличие заключается в том, что вращение с электродвигателя 3 передается на вал 5 с помощью шлицевой муфты 4. Между кругом 1 и валом 5 установлен пьезоэлектрический диск, который может использоваться в качестве высокочастотного вибратора или датчика, контролирующего процесс обработки как с применением гидравлических ударов, так и без них.

Пьезоэлектрический диск 6 крепится к фланцу вала 5 на клей или специальную смолу. Точно так же крепится круг 1 к пьезоэлектрическому диску 6. С помощью пьезоэлектрического диска можно шлифовать твердые и хрупкие материалы (без применения гидравлических ударов), а также пластичные и вязкие материалы (применяя гидравлические удары). Устройство с пьезоэлектрическим диском расширяет возможности эффективного шлифования разных материалов. Способы установки кругов на устройства могут быть самые разные. При этом амплитуда перемещения круга зависит от величины приложенного напряжения и продолжительности импульса, а частота колебаний – от количества импульсов в единицу времени.

Устройства, изображенные на рис. 4 и рис. 5, обеспечивают выполнение процесса шлифования вращающимся кругом с ультразвуковыми перемещениями круга. Такие устройства могут работать с разными пьезоэлектрическими элементами, управляющими и контролирующими перемещениями круга в процессе обработки. С помощью устройства, изображенного на рис. 5, можно производить шлифование торцевой или боковой поверхностью круга 1, или боковой и торцевой поверхностями одновременно. В зависимости от этого, а также марки обрабатываемого материала можно применять (или не применять) ультразвуковые перемещения круга от гидравлических ударов или пьезоэлектрического элемента, которые можно использовать в разных комбинациях.

Для повышения эффективности обработки твердых хрупких и вязких

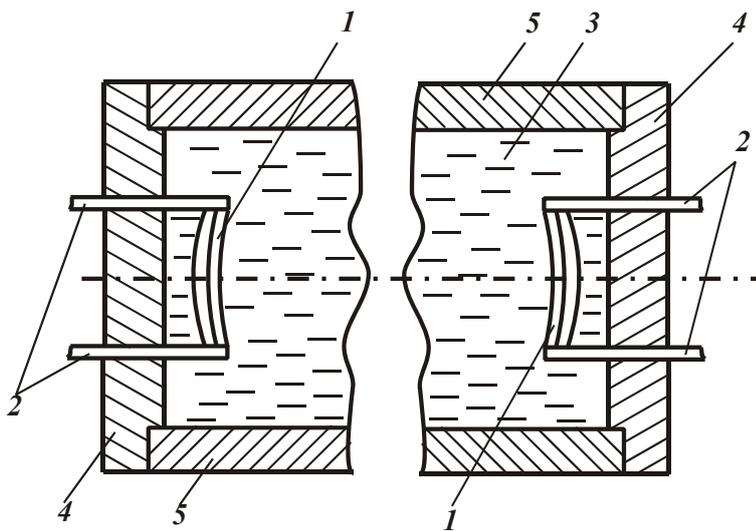


Рис. 6. Ультразвуковое шлифование и обработка поверхностей пьезоэлектрическими элементами: 1 – пьезоэлектрический элемент; 2 – держатели-электроды, через которые подводится электрический ток к пьезоэлектрическим элементам; 3 – обрабатывающая жидкость с абразивным материалом; 4 – заглушки; 5 – обрабатываемая труба.

щих зерен организуются группами в разные стороны. На это тратится значительно меньше энергии. Эти колебания взаимно уравниваются, не вызывают автоколебаний круга, изменяют направления режущих зерен, что повышает эффективность обработки. Такие круги могут обеспечить мгновенное чередование рисков и чередование реверсивного резания под любыми углами. Они позволят расширить технологические возможности как при обработке разных материалов, так и при осуществлении контроля и реализации обратных связей. Переходя к разработке новых сложных абразивных инструментов, рассмотрим первоначально приведенные выше, но более усложненные пьезоэлектрические системы для ультразвуковых колебаний при абразивно-шлифовальной обработке.

Проведем анализ устройства, показанного на рис. 6. Подавая разные потенциалы на пластины и диски пьезоэлектрических элементов, обеспечиваются их колебательные движения в абразивной жидкости, что приводит к движению жидкости в трубке и цилиндре и шлифованию поверхностей.

Возникает вопрос: нужны ли нам такие шлифовальные системы? В настоящее время шлифование труб осуществляется пропусканием абразивной жидкости под большим давлением. Да, нужны! Во-первых, не все трубы можно шлифовать под большим давлением. Например, тонкостенные трубы просто не выдержат, да и толстостенные трубы не из всяких материалов можно подвергать большому давлению.

Шлифование труб пропусканием жидкости под давлением требует специальных насосов, вращение трубы во время обработки весьма затруднительно – обработка происходит неравномерно в начале подачи жидкости и в конце, а также по всей поверхности трубы. Движение потока абразивной жидкости идет

материалов нужен новый подход к созданию абразивно-шлифовального инструмента и шлифовальных кругов. Нужны новые системы ультразвуковых колебательных перемещений, позволяющие колебательные перемещения режущих зерен осуществлять в разных направлениях с достаточно большой амплитудой. Ультразвуковые перемещения всего круга или обрабатываемой детали требуют больших энергетических затрат и контроля автоколебаний, поэтому необходимы новые круги, в которых колебательные перемещения режу-

в одном направлении. Обработка труб малых диаметров также затруднительна. Всех этих недостатков можно избежать, применяя пьезоэлектрические элементы (рис. 6) и изменяя за счет этого направления потоков абразивной жидкости в любых направлениях. Например, пьезоэлектрические элементы работают в такт (рис. 6) и совсем другой поток и воздействие абразивной жидкости будет, если пьезоэлектрические элементы будут работать в противофазе. При изменении углов пьезоэлектрических элементов изменяется направление потока абразивной жидкости. Кроме этого, во время обработки отсутствуют проблемы, связанные со способом вращения обрабатываемой трубы. Пьезоэлектрические элементы можно приближать и удалять друг от друга, устанавливая их под разными углами, выдвигая один электрод на большую величину, чем другой, что значительно изменяет направление потока. Пьезоэлектрические элементы можно устанавливать параллельно обрабатываемой поверхности, т.е. направлять поток абразивной жидкости от элемента прямо на обрабатываемую поверхность. Частоту и амплитуду колебаний также легко изменять. Изменением частоты колебательных движений в жидкости можно вызвать образование кавитационных пузырьков, что очень эффективно при обработке пластичных и вязких материалов, т.к. одновременно с процессом шлифования упрочняется обрабатываемый слой материала. Этот способ можно использовать для обработки труб с очень маленьким диаметром, зигзагообразных труб и отверстий разной кривизны.

Пьезоэлектрические элементы на подвижных держателях-электродах можно применять для ультразвуковой размерной обработки с целью формирования разных криволинейных отверстий малых размеров в различных деталях

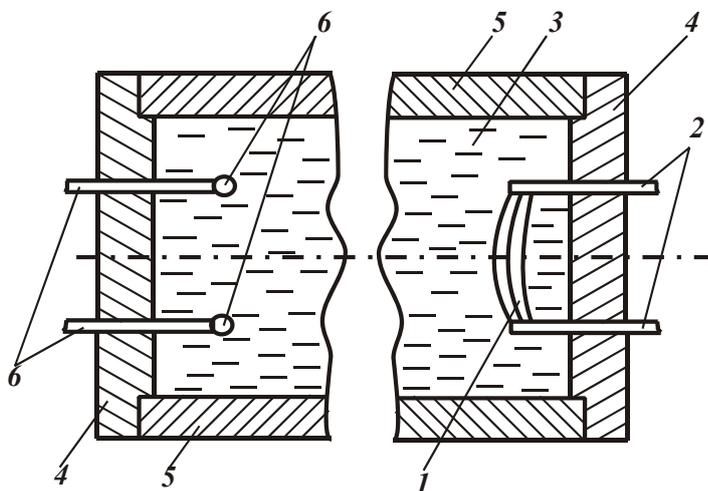


Рис. 7. Ультразвуковое шлифование и обработка поверхностей пьезоэлектрическими элементами и гидравлическими ударами от электрических разрядов: 1 – пьезоэлектрический элемент; 2 – держатели-электроды, через которые подводится электрический ток к пьезоэлектрическим элементам; 3 – обрабатывающая жидкость с абразивным материалом; 4 – заглушки; 5 – обрабатываемая труба; 6 – электроды для гидравлических ударов от электрических разрядов.

из определенных материалов. С помощью пьезоэлектрических элементов также можно производить шлифование не только закрытых поверхностей (как показано на рис. 6), но и любых открытых. В этом случае пьезоэлектрический элемент подводится к поверхности обрабатываемой детали, покрытой абразивной жидкостью. Абразивная жидкость под действием пьезоэлектрического элемента совершает колебательные движения, а сам элемент перемещается по обрабатываемой поверхности в нужном направлении. Обработка может проводиться с кавитационными явлениями или без них. С помощью пьезо-

электрического элемента эффективно выполнять дошлифовальную и послешлифовальную обработку поверхностей. Для этого подбирается соответствующая жидкость без абразива. Дошлифовальная обработка может проводиться с целью очистки поверхности, предварительной эрозионной обработки агрессивной жидкостью с кавитационными явлениями, образования микротрещин на обрабатываемой поверхности или образования уплотнений и наклепа вязких материалов.

Послешлифовальная обработка поверхностей в соответствующих жидкостях может проводиться с целью упрочнения пластичных вязких материалов, уменьшения шероховатости, отрыва и устранения отдельных микрочастиц абразивного и обрабатываемого материала с поверхности, образования защитных пленок покрытий и т.д. Применяя одновременно пьезоэлектрические элементы и гидравлические удары от электрических разрядов, приходим к новому виду обработки внутренних поверхностей закрытых емкостей. Устройство, показанное на рис. 7, позволяет производить обработку шлифованием от гидравлических ударов или пьезоэлементами, или совместно гидравлическими ударами и пьезоэлементами. Принцип работы этого устройства понятен из описанных ранее устройств и из рис. 7. Количество и порядок размещения пьезоэлектрических элементов и электродов для гидравлических ударов могут быть разными. Совместная работа шлифования гидравлическими ударами и пьезоэлементами дополняет друг друга. Во время электрического разряда на электродах при образовании гидравлического удара образуется некоторое количество газов, которыми насыщается абразивная жидкость, а пьезоэлектрический элемент создает более благоприятные условия для образования кавитационных пузырьков в насыщенной газом жидкости.

Таким образом, при разработке новых абразивно-шлифовальных способов обработки очень важно использовать все возможные положительные и отрицательные явления существующих способов, совмещать и управлять ими.

Литература: 1. Дудин А.Т., Новиков Ф.В. Двигатели и технологии: Учеб. пособие / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. – Одесса: ОНПУ, 2004. – 280 с. 2. Дудин А.Т., Новиков Ф.В. Конструкторское обеспечение новых технологий шлифования // Труды 13-й Международной научно-технической конференции. Физические и компьютерные технологии. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2007. – С. 154-168. 3. Дудин А.Т. Прогрессивные конструкции абразивных инструментов // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – “Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні”. – 2007. – Вип. 61. – С. 187-192.

УДК 621.923

ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Черненко А.В. (г. Харьков, Украина)

In the work the feasibility study the effectiveness of processes of mechanical.

Создание конкурентоспособной машиностроительной продукции требует применения эффективных высокопроизводительных и малоэнергозатратных технологических процессов металлообработки, обеспечивающих высокое качество изготавливаемых изделий и снижение технологической себестоимости и

цены готовой продукции. В связи с этим выбор наилучших вариантов технологических процессов механической обработки следует производить по критерию себестоимости обработки [1]. Рассматривая две первые статьи затрат, связанные с заработной платой рабочего и затратами на инструменты, себестоимость обработки C выражается:

$$C = N \cdot t_H \cdot S \cdot k + \frac{N \cdot t_H}{T} \cdot Ц, \quad (1)$$

где N – количество изготавливаемых деталей, шт.; t_H – норма времени на обработку деталей, мин; S – тарифная ставка рабочего, грн; k – коэффициент, учитывающий начисления на заработную плату рабочего; T – стойкость инструмента, мин; $Ц$ – цена инструмента, грн.

Как следует из приведенной зависимости, уменьшить себестоимость обработки C можно уменьшением параметров t_H , $Ц$ и увеличением T . Общеизвестно, что параметры t_H и T связаны между собой условиями обработки (режимом резания, характеристиками инструмента и т.д.). Поэтому для обоснования путей уменьшения себестоимости обработки C необходимо знать функциональные связи между параметрами t_H и T , установленные аналитическим или эмпирическим путем. Обычно в расчетах эти связи не рассматривают, сравнивают по себестоимости лишь отдельные варианты обработки для вполне конкретных значений t_H и T . В результате приходят к частным решениям, далеко не оптимальным. Для того чтобы получить более общие оптимальные решения, необходимо подчинить экономическую формулу себестоимости обработки C технологическим закономерностям в виде функциональной связи t_H и T , т.е. по сути, соединить знания экономиста и технолога. Этот путь открывает принципиально новые возможности в проектировании технологических процессов и технологической подготовки производства.

Например, подстановкой в приведенную зависимость формулы для расчета стойкости инструмента T , выраженной через t_H , определяется экстремум (минимум) себестоимости обработки C и реализующие ее оптимальные значения параметров t_H и T . Это позволяет с единых позиций сравнивать различные схемы обработки на разном оборудовании, режимы резания, характеристики режущих инструментов, обосновать способы увеличения T и уменьшения t_H и $Ц$ (за счет применения износостойких покрытий инструментов, прогрессивных технологий его обработки, новых конструкций инструментов и т.д.).

В настоящее время проблемам механической обработки деталей машин уделяется чрезвычайно большое внимание. Однако не достаточно математически описаны технологические параметры обработки, которые входят в формулу себестоимости обработки. В связи с этим нами разработаны новые математические модели различных технологических процессов обработки, позволяющие установить аналитические зависимости между основным временем обработки, стойкостью инструмента, параметрами качества обработки и на их основе провести анализ себестоимости обработки, выбрать лучшие варианты и разработать практические рекомендации по совершенствованию действующей техно-

логии. На этой основе разработаны и внедрены эффективные процессы алмазного шлифования с применением высокопроизводительных схем глубинного шлифования, маршрутно-операционной технологии финишной обработки материалов повышенной твердости с обеспечением высоких показателей точности и качества обработанных поверхностей и т.д. Например, разработан и внедрен эффективный технологический процесс круглого наружного шлифования твердосплавных изделий алмазными кругами на металлических связках с плосковершинными зернами, обеспечивающий повышение производительности обработки при одновременном улучшении шероховатости поверхности до уровня $R_a = 0,1 \dots 0,2$ мкм [2]. Это позволяет предварительное и окончательное шлифование совместить в одну операцию и исключить из технологического процесса трудоемкую операцию притирки абразивным порошком, что резко снижает технологическую себестоимость обработки.

В ОАО Харьковский завод “Гидропривод” внедрены разработанные эффективные технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов, исключаящие прижоги и другие температурные дефекты на обрабатываемых поверхностях. Это позволило существенно уменьшить потери от брака и снизить технологическую себестоимость обработки. Эффект достигнут, в частности, на ряде операций за счет перехода от шлифования к тонкому (алмазному) точению, позволяющему снизить тепловую и силовую напряженность процесса резания и повысить качество обработки.

На Харьковском заводе “Потенциал” разработана и внедрена эффективная маршрутно-операционная технология финишной абразивной технологии торцовых уплотнительных колец из труднообрабатываемого композиционного материала на основе релита. Технология включает черновое плоское шлифование колец абразивным или алмазным кругом на металлической связке, получистовое шлифование торцовой поверхности вращающегося кольца торцом алмазного круга на внутришлифовальном станке и притирку торцовой поверхности кольца на доводочном станке с помощью алмазного порошка. В итоге технология обеспечивает высокие требования по точности и шероховатости обработки ($R_a = 0,05$ мкм). Данный вариант финишной обработки торцовых уплотнительных колец признан наилучшим по критериям себестоимости, производительности, качества и точности обработки.

На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований произведен выбор наилучшего варианта технологического процесса механической обработки герметичных резьбовых отверстий в баллонах в условиях массового производства ОАО “Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича”. Он основан на теоретически обоснованном выборе прогрессивной схемы базирования заготовок баллонов, на новых технических решениях по созданию специальной инструментальной головки для одновременной обработки наружной и внутренней цилиндрических поверхностей и торцовой поверхности горловины баллона, системы автоматизированной подналадки останова рабочего хода инструментальной головки, кондуктора для повышения жесткости технологической системы и специального приспособления для точной установки

инструментальной головки. В результате внедрения нового варианта технологического процесса потери от брака продукции по качеству нарезания конической резьбы снизились с 15,5% до 1,3%. При этом достигнут значительный экономический эффект, связанный также с концентрацией технологических переходов за счет применения специальной инструментальной головки.

На основе выполненных исследований произведен выбор наилучших вариантов операций круглого наружного шлифования ответственных валов приводов шахтных конвейеров. Их применение в ОАО ХМЗ “Свет шахтера” позволило повысить производительность и снизить себестоимость обработки при обеспечении требуемой точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей. Для решения данных задач был разработан новый теоретический подход к оптимизации структуры и параметров операций круглого наружного шлифования по критерию наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности. Это позволило определить оптимальное количество переходов, значения скоростей подач и величин снимаемых припусков. В частности, теоретически и экспериментально доказана возможность существенного повышения эффективности шлифования за счет применения схемы шлифования последовательными врезаниями – с радиальной подачей уступами.

Литература: 1. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.10. “Концепция развития технологии машиностроения ” – Одесса: ОНПУ, 2005. – 565 с. 2. Новиков Ф.В., Дитиненко С.А., Ковальчук А.Н. Прецизионная обработка твердосплавных изделий алмазными кругами на металлических связках. – Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации [Текст]: материалы III Международной научно-технической конференции: в 2 ч. Ч. 2: Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 2005. – С. 143-147.

УДК 621. 923

СГЛАЖИВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

Шкурупий В. Г., канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)

Consider technological methods of reducing the roughness of the surface with the abrasive machining.

Основное влияние на съем металла и на формирование поверхностного слоя полированных деталей оказывают абразивные материалы. Абразивная способность микропорошков влияет на интенсивность съема материала и качество формирования поверхностного слоя обрабатываемых деталей.

Применение абразивных материалов особенно выгодно для окончательной обработки высокоточных деталей с заданными характеристиками светоотражательных поверхностей, где требуется получение малых значений высотных параметров шероховатости поверхности при съеме минимальных припусков.

Эти же абразивные материалы хорошо оправдали себя на финишных операциях обработки деталей, предназначенных для работы в условиях трения и износа. При этом необходимо обеспечивать минимальное шаржирование обра-

ботанных поверхностей абразивными частицами. Для определения съема материала с обрабатываемой детали и изучения характера формирования их поверхностного слоя применялась обработка абразивными материалами с различной зернистостью при одинаковых условиях обработки.

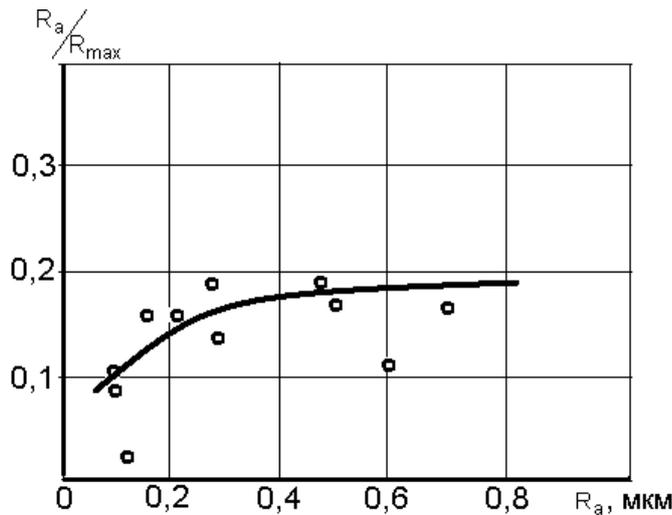


Рис 1. Изменение отношения высотных параметров шероховатости поверхности при шлифовании перед полированием.

параметру R_a . Характер изменения высотных параметров шероховатости поверхности при шлифовании представлен на рис. 1.

Реальные абразивные зерна, как правило, имеют различную форму, которая изменяется в процессе обработки. Субмикрорельеф абразивных зерен оказывает существенное влияние на характер формирования обработанных поверхностей. Авторы работ [1, 2] рассматривали субмикрорельеф различных абразивных зерен и следы их царапания, ими установлено существенное различие параметров субмикропрофиля зерен абразива.

Нами проведены исследования по определению влияния субмикронеровностей зерен на характер формирования полированных поверхностей. С помощью электронного микроскопа установлено, что субмикронеровности абразивных зерен перед обработкой и после обработки имеют разную форму, так как в процессе обработки режущие кромки абразивных зерен изнашиваются и разрушаются. Существенную роль при формировании полированных поверхностей играют субмикронеровности абразивных зерен, особенно в случаях преобладающего количества перекатывающихся или шаржированных зерен. Эти явления будут определяться, по нашему мнению, давлением полировальника на обрабатываемую поверхность.

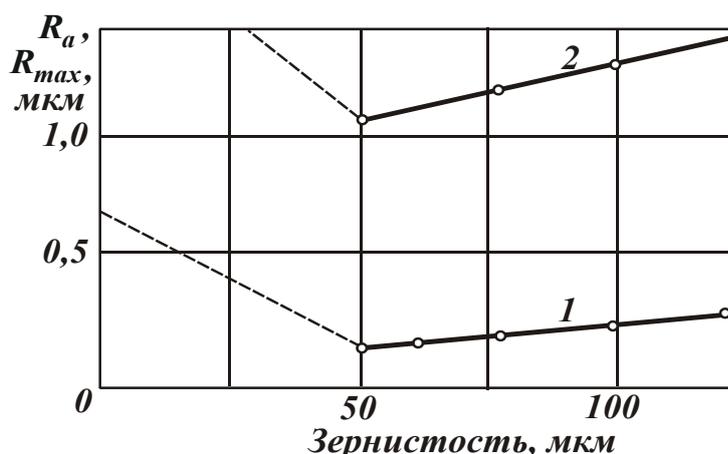


Рис. 2. Влияние зернистости абразива на изменение высотных параметров шероховатости поверхности: режим обработки – давление 40 МПа; скорость резания 35 м/с; время обработки 20с; 1 – R_a до обработки 0,68 мкм; 2 – R_{max} до обработки 3,64 мкм.

В качестве абразивных зерен использовался электрокорунд нормальный М28/20. Для меньшей зернистости расчеты представляют определенные трудности. Образцы предварительно обрабатывали шлифованием абразивными кругами до шероховатости 0,1–0,2 мкм, по

параметру R_a . Характер изменения высотных параметров шероховатости поверхности при шлифовании представлен на рис. 1.

Реальные абразивные зерна, как правило, имеют различную форму, которая изменяется в процессе обработки. Субмикрорельеф абразивных зерен оказывает существенное влияние на характер формирования обработанных поверхностей. Авторы работ [1, 2] рассматривали субмикрорельеф различных абразивных зерен и следы их царапания, ими установлено существенное различие параметров субмикропрофиля зерен абразива.

Нами проведены исследования по определению влияния субмикронеровностей зерен на характер формирования полированных поверхностей. С помощью электронного микроскопа установлено, что субмикронеровности абразивных зерен перед обработкой и после обработки имеют разную форму, так как в процессе обработки режущие кромки абразивных зерен изнашиваются и разрушаются. Существенную роль при формировании полированных поверхностей играют субмикронеровности абразивных зерен, особенно в случаях преобладающего количества перекатывающихся или шаржированных зерен. Эти явления будут определяться, по нашему мнению, давлением полировальника на обрабатываемую поверхность.

Существенную роль при формировании полированных поверхностей играют субмикронеровности абразивных зерен, особенно в случаях преобладающего количества перекатывающихся или шаржированных зерен. Эти явления будут определяться, по нашему мнению, давлением полировальника на обрабатываемую поверхность.

На высотные параметры шероховатости поверхности полированных деталей заметное влияние оказывает размер абразивных зерен. Характер изменения высотных параметров шероховатости поверхности при обработке абразивами большой зернистости представлен на рис. 2. Характер формирования поверхностного слоя при полировании войлочным полировальником с абразивами различной зернистости разный. Как видно из результатов, представленных на рис. 2, высотный параметр шероховатости поверхности R_a не превышал значения 0,2 мкм.

Наименьшие значения высотных параметров шероховатости обработанной поверхности наблюдаются при полировании абразивом с малой зернистостью (например, алмазная паста АСМ 2/1, полировальник из войлока).

Большую роль при формировании поверхностного слоя полированных деталей играют количество активных абразивных зерен на единице площади, глубины их резания-царапания или пластического деформирования, которые в свою очередь зависят от размеров, формы и природы абразивного материала, а также от материала полировальника и детали, контактирующих с абразивными зернами. Чтобы установить количество активных абразивных зерен, фактиче-

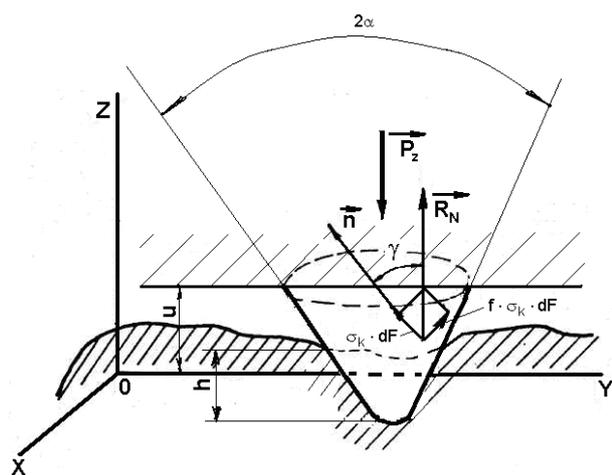


Рис. 3. Внедрение в обрабатываемую поверхность шаржированного в полировальник абразивного зерна под действием нагрузки.

ский контакт для перекатывающихся и закрепленных зерен на единице площади (мм^2), глубину их внедрения, были проведены исследования. Их проводили на специальном полировальном стенде конструкции ХНЭУ. Оценку количества абразивных частиц производили с помощью микроскопа МИС-11 и микроинтерферометра МИИ 4. Давление измеряли в пределах $(0,1-1,0) \cdot 10^2$ кПа. Для эксперимента использовали образцы, изготовленные из сплава 36НХТЮ (HRC 50). Абразивный состав наносился на полировальник шириной 1 мм от центра. Образец подводили к полировальнику, а затем полировальный круг поворачи-

вали вручную на 15° . С помощью микроскопов и микроинтерферометра исследовали полученные поверхности. Для оценки следов обработки исходили из следующих предположений. В обработке участвуют закрепленные в полировальник (рис. 3) и перекатывающиеся (рис. 4) зерна.

При давлении $(0,1-0,3) \cdot 10^2$ кПа на обрабатываемой поверхности в основном находятся следы от перекатывающихся зерен. Количество активных абразивных зерен находится в пределах 120–130 на 1 мм^2 . Глубина их внедрения равна 2–3 мкм при ширине отпечатка 3–4 мкм.

Вид обработанной поверхности при увеличении давления полировальника до $(0,4-0,5) \cdot 10^2$ кПа можно объяснить иным характером работы абразивных зерен. Количество активных абразивных зерен не изменяется и находится в

пределах 120–130 на 1 мм². Однако при этом меняется характер работы зерен и наблюдается приблизительно одинаковое количество перекатывающихся и закрепленных зерен. Глубина их внедрения находится в пределах 3–4 мкм при ширине следов отпечатков 4–5 мкм.

С увеличением давления (свыше $0,5 \cdot 10^2$ кПа) на сформированной поверхности имеются характерные следы закрепленных зерен, хотя количество активных зерен уменьшается и находится в пределах 90 зерен на 1 мм².

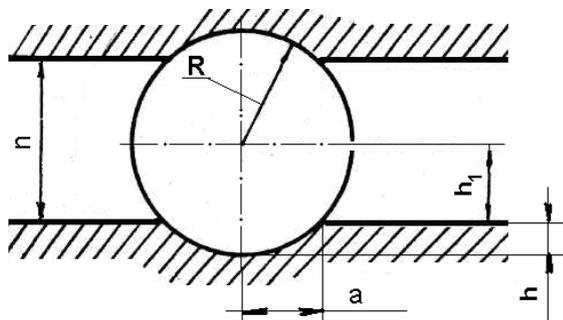


Рис. 4. Внедрение в обрабатываемую поверхность перекатывающегося абразивного зерна.

Однако большинство отпечатков и следов, характерных для работы активных зерен, находится при глубине их внедрения 3–4 мкм при ширине отдельных отпечатков и следов 4–5 мкм. В отдельных случаях на обработанных поверхностях имеются следы и отпечатки, характерные для работы закрепленных зерен,

что приводит к появлению грубых царапин (рис. 5), а также случаев столкновения абразивных зерен друг с другом. Зная число активных абразивных зерен (перекатывающихся и закрепленных) на единице площади (в 1 мм²), находим фактический контакт абразивных зерен с обрабатываемой деталью. Контакт одного перекатывающегося зерна рассматриваем как площадь шарового сегмента, поскольку характер контакта перекатывающихся зерен по форме близок к шаровому сектору (рис. 4). Тогда площадь контакта одного перекатывающегося зерна

$$S_n = \pi \cdot R(2h + a).$$

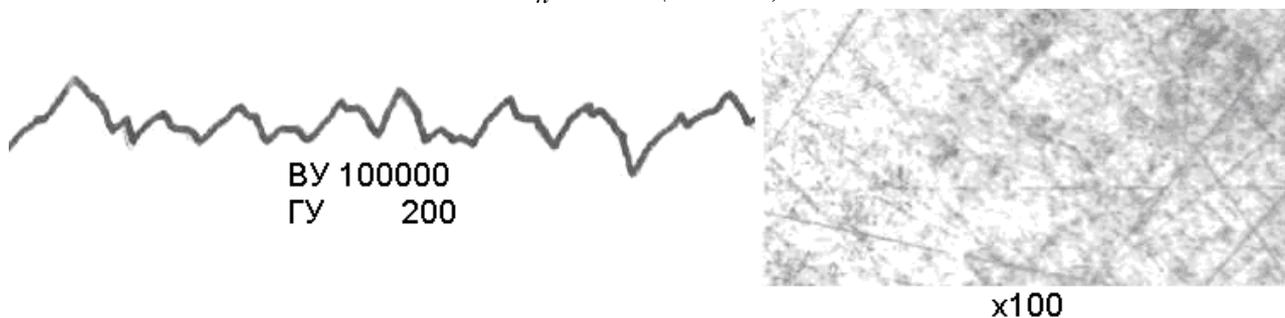


Рис.5. Профилограмма и фотография поверхности образца из сплава марки АмГб после полирования.

Используя схему внедрения зерна в металл, находим площадь следа одного закрепленного зерна [3]:

$$S_3 = \frac{h^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \frac{\pi}{4}}{\cos \alpha} \cdot l.$$

Если известно количество активных перекатывающихся и закрепленных зерен, участвующих в формировании поверхности полированных деталей, то легко найти площадь контакта между абразивными зернами и обрабатываемой деталью. Тогда общая площадь перекатывающихся зерен на единице площади:

$$S_{on} = S_n \cdot n \cdot k,$$

где S_n – площадь следа одного перекатывающегося зерна; n – количество перекатывающихся зерен на единице площади; k – коэффициент разрушения абразивных зерен в процессе обработки.

Общая площадь контакта для закрепленных зерен на единице площади

$$S_{oz} = S_z \cdot n \cdot k,$$

где S_z – площадь следа одного закрепленного зерна; n – количество закрепленных зерен на единице площади; k – коэффициент разрушения абразивных зерен в процессе обработки.

Зная площадь контакта для закрепленных и перекатывающихся зерен, находим общую площадь контакта между абразивными зернами и обрабатываемой деталью на единице площади:

$$S_o = S_{oz} + S_{on}.$$

Обработка фотографий позволила определить фактическую величину контакта абразивных зерен, которая находится в пределах 10–15% номинальной площади. С увеличением давления величина фактического контакта по площади возрастает.

Таким образом, основную роль в формировании поверхностного слоя играют давление полировальника на обрабатываемую деталь, форма и размер абразивного зерна. В процессе обработки форма и размеры зерна изменяются. С увеличением размера абразивного зерна съем материала возрастает. Шероховатость полированной поверхности зависит от размера абразивного зерна. Появление грубых царапин на обрабатываемой поверхности свидетельствует о столкновении абразивных зерен.

Сила прижима полировальника будет распределяться на суммарную площадь контакта перекатывающихся и закрепленных зерен с обрабатываемой поверхностью. Если площадь контакта перекатывающихся зерен будет превалировать над закрепленными, то это будет содействовать сглаживанию поверхностного слоя обрабатываемой поверхности.

Хороший эффект может дать применение овализированных абразивных порошков, например, термическим или другими методами [4]. При термическом методе происходит выгорание мелкой фракции, закрепление узлов у основной фракции, а также сгорание примесей, содержащихся в порошках. Уникальными свойствами обладают абразивные порошки, полученные газодисперсным синтезом. Они обладают следующими преимуществами перед выпускаемыми промышленностью и полученными другими методами овализации:

1. Минимальной величиной фракции (около 0,01 мкм).
2. Равномерностью фракции (от 0,07 до 1,04 мкм).
3. Сферической формой абразива.
4. Наличием окиси алюминия (Al_2O_3) до 99,9%.

Технология получения данных абразивов позволяет изготавливать их из отходов промышленности непрерывно с экологической чистотой. Кроме этого, одним из методов, позволяющих избежать шаржирования поверхности, а также уменьшить толщину оксидной пленки, является использование полирования по

схеме приведенной на рис. 6. При обработке использовали неабразивную составляющую в виде дистиллированной воды с концентрацией абразива. Его соотношение на одну часть абразива четыре части дистиллированной воды. Добавки поверхностно-активных веществ в виде аэросила могут дать улучшенные характеристики поверхности.

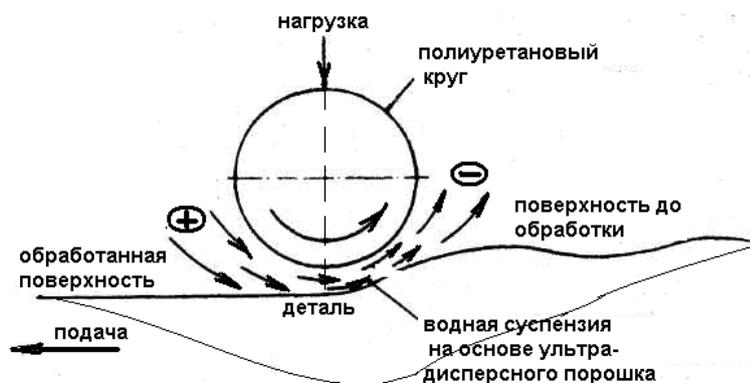


Рис. 6. Схема полирования суспензией на основе ультрадисперсного порошка.

В процессе такой обработки изломы в кристаллических зонах, расположенных между дефектами, становятся эластичными и могут разрушить идеальные связи между атомами. Минимальный участок излома может иметь размеры порядка размера атома.

Наличие укрупненной фракции ведет к царапанию

обрабатываемой поверхности, а измельчение – к шаржированию.

Литература: 1. Ваксер Д.Б. Пути повышения производительности абразивного инструмента при шлифовании. – М.–Л.: Машиностроение (Ленинградское отделение), 1964. – 176 с. 2. Кащеев В.Н. Абразивное разрушение твердых тел. – М.: Наука, 1970. – 247 с. 3. Сагарда А.А. Закономерности микрорезания единичным алмазным зерном // Научно-производственный сборник. Синтетические алмазы. – Киев, 1969, вып. 2. – С. 9-14. 4. Морохов И.Д., Алымов М.И. Ультрадисперсные порошки и материалы на их основе. – М.: Вестник машиностроения, 1992, № 6 – 7. – С. 41-42.

УДК 539.221

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОВОЛНОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Спольник А.И., докт. физ-мат. наук, Волчок И.В., канд. физ-мат. наук, доцент, Калиберда Л.М., доцент, Чегорян М.А., канд. физ-мат. наук, доцент (г. Харьков, Украина)

Results theoretical and experimental researches of applicability of methods of ferromagnetic and paramagnetic resonances for an estimation of quality of a surface are resulted. It is shown that both methods supplement each other and can be used for the express control of a roughness on-verhnostej various materials.

В работе теоретически и экспериментально исследуется возможность применения таких методов микроволновой спектроскопии, как ферромагнитный резонанс (ФМР) и электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), для оценки шероховатости поверхностей.

1. Метод ФМР. Ширина линии ФМР ΔH чувствительна к качеству поверхности ферромагнитных металлических образцов [1]. Для получения аналитической зависимости ширины линии от шероховатости поверхности использовано двухмагнетонное приближение [2]. В этом приближении найдено время

релаксации и, следовательно, ширина линии ФМР, связанные с рассеянием однородного магнона на дефекте поверхности, имеющем полусферическую форму радиуса R . В приближении независимых рассеивателей ширина линии определяется поверхностной плотностью дефектов N и их радиусом R . В случае металлических образцов необходимо учитывать особенности в поведении ширины линии, связанные со скин-эффектом на сверхвысоких частотах. Анализ этих особенностей показал, что основное влияние на ширину линии будут оказывать дефекты поверхности с размерами R сопоставимыми с глубиной скин-слоя δ . При размерах $R \gg \delta$ зависимость ширины линии от R пропадает, и она определяется только поверхностной плотностью N дефектов (т.е. количеством дефектов поверхности на единицу площади поверхности):

$$\Delta H \cong \begin{cases} 9\pi^2 M_0 \cdot N \cdot \sqrt{\frac{2\pi}{\alpha}} \cdot R^3, & R \leq \delta, \\ 4\pi \cdot M_0 \cdot N \cdot \frac{\delta^6}{\alpha^2}, & R \gg \delta. \end{cases}$$

Здесь M_0 - намагниченность насыщения ферромагнетика, α - обменная постоянная.

Экспериментальная проверка полученных выражений проводилась на образцах из никеля, которые электрополировались, а затем на их поверхность наносились отпечатки алмазной пирамидкой на микротвердомере ПМТ-3. Количество отпечатков достигало 10^4 , а размеры удавалось изменять в пределах от 10 до 100 мкм. Резонансные измерения проводились на микроволновом спектрометре на частоте 36 ГГц с использованием стандартной методики [3]. Экспериментально обнаружена линейная зависимость ширины линии от плотности отпечатков (дефектов), что находится в качественном согласии с теорией в области $R \gg \delta$ ($\delta \sim 0,1$ мкм на частоте 36 ГГц).

Для моделирования поверхностных дефектов с $R \sim \delta$ было использовано избирательное травление никеля, выявляющее дислокации. После применения специального травителя на поверхности образца возникли ямки травления, соответствующие дислокациям, средний размер которых изменялся в пределах 0,103 мкм длительностью травления. Измерения ΔH на одном и том же участке образца ($N = const$), но с разными размерами R показали зависимость $\Delta H_m \sim R^3$, т.е. имеет место качественное согласие с теорией.

Наблюдаемое в работе качественное согласие между теорией и экспериментом, а также высокая чувствительность ФМР к состоянию поверхности ферромагнетика указывают на возможность использования этого метода для оценки качества поверхности ферромагнитных металлов и сплавов под слоем диэлектрика, который не экранирует СВЧ-поле.

2. Метод ЭПР. Для расширения применимости микроволновой спектроскопии как метода оценки качества поверхностей на любые материалы (не только ферромагнитные) в работе предложен и апробирован новый метод, названный нами методом парамагнитных реплик. Этот метод заключается в нанесении мелкодисперсного парамагнитного порошка на наклонно расположенную испытываемую поверхность, последующего снятия остатков порошка

липкой лентой. Полученная таким образом парамагнитная реплика поверхности образца помещается в микроволновый спектрометр и регистрируется интенсивность сигнала ЭПР [3]. Интенсивность сигнала ЭПР I пропорциональна массе частиц парамагнитного порошка, находящегося на липкой ленте, масса в свою очередь прямо пропорциональна шероховатости поверхности: $I \sim K \cdot R_z$, где K - коэффициент пропорциональности, зависящий от размера и парамагнитных свойств частиц порошка, R_z - высота неровностей профиля [4]. В работе в качестве парамагнитного порошка использовался парамагнетик $C_5MnCl_3 \cdot 2H_2O$, измельченный до среднего размера частиц 1 мкм. Эксперименты по определению зависимости интенсивности сигнала ЭПР от класса чистоты поверхности показали, что вплоть до 9 класса чистоты ($R_z \cong 1,6$ мкм) наблюдается линейная зависимость $I \sim R_z$. Сигналы ЭПР от реплик с поверхностями более высоких классов чистоты в пределах погрешности измерений не отличались. Это связано с тем, что размеры неровностей, соответствующие более высоким классам чистоты, меньше размеров частиц порошка и не препятствуют скатыванию последних с наклонной поверхности.

Подбором размера частиц порошка и его парамагнитных свойств можно добиться высокой чувствительности такого метода, а быстрота измерения ЭПР делает его экспрессным.

Таким образом, методы ФМР и ЭПР дополняют друг друга и, используя один и тот же микроволновый спектрометр, можно быстро оценивать чистоту поверхностей любых материалов.

Литература: 1. Спольник А.И., Волчок И.В., Калиберда Л.М. Применение ферромагнитного резонанса для исследования коррозии и качества поверхности металлов //Доповіди НАН України.-1999.-№2.-С.102-105. 2. Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках.- М.: Наука,-1973.-591 с. 3. Пул Ч. Техника ЭПР спектроскопии.- М.: Мир,-1970.-557 с. 4. Хусу А.П., Витинберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей.- М.: Наука,-1975.-344 с.

УДК 621.9

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДОВАНИЯ

Набока Е.В., канд. техн. наук, **Лысюк В.В.**, (г. Харьков, Украина)

In the work for a management of quality making of detail the construction of cascade counts is considered, with the purpose of account of technological inheritance.

Перспективным направлением повышения качества показателей выпускаемой продукции является управление технологической системой. С этой целью необходимо всесторонне исследовать действие технологической последовательности. Все операции и их технологические переходы следует рассматривать не изолированно, а во взаимосвязи, так как конечные характеристики изделия формируются всем комплексом технологических воздействий.

Процессом технологического наследования можно управлять, для того чтобы свойства, положительно влияющие на качество детали, сохранить в те-

чение всего технологического процесса, а свойства, влияющие отрицательно, - ликвидировать в его начале.

Использование метода корреляционного анализа требует большого количества замеров, что представляет существенные трудности, особенно для высокоточных деталей.

Количественные связи технологического наследования позволяют определить, насколько велико влияние наследственности на надежность работы детали в собранной машине.

Каждое ребро графа характеризуется передачей ребра k . Свойство $*_0$, выраженное любой вершиной графа, изменяется в ходе технологического процесса и характеризуется величиной

Таким образом, $x_1 = (1/k)x_0, x_1 = x_0/k$, следовательно, передача представляет собой коэффициент, показывающий количественное изменение свойства.

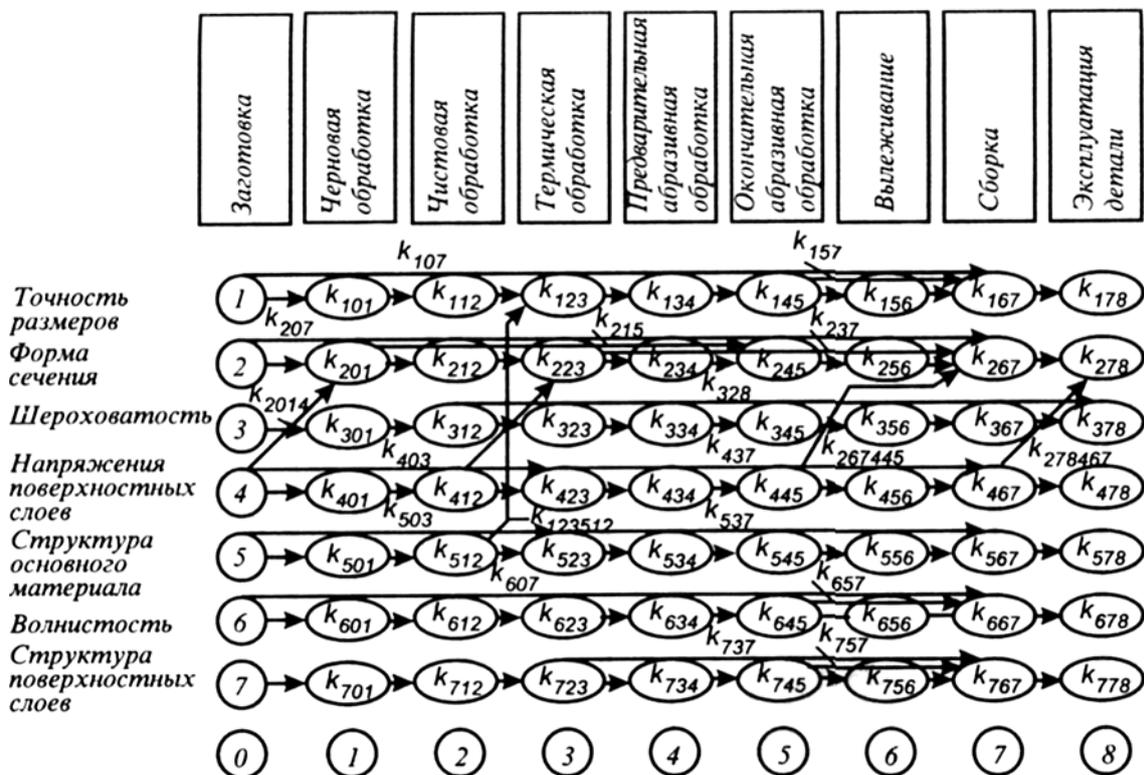


Рис. 1. Граф технологического процесса

Рассмотрим граф (рис.1.), который предусматривает, с одной стороны, последовательность операций технологического процесса, а с другой - основные параметры детали и их изменение в ходе технологического процесса. Граф показывает не только влияние отдельных параметров детали на качество сборки, но и изменение этих параметров в процессе эксплуатации собранного изделия. Свойства (параметры) заготовки (точность размеров, отклонение формы сечения, шероховатость и пр.) занумерованы, как и операции технологического процесса. Из графа видно, что точность размеров заготовки за счет явлений наследственности определенным образом сказывается на детали, поступающей на сборку. Операции технологического процесса существенным образом влияют на точность размеров, последовательно увеличивая ее, однако рассеяние

размеров готовых деталей оказывается связанным с рассеянием размеров заготовки. Аналогично отклонения формы заготовок могут наследоваться и проявляться на сборке.

Технологическая последовательность изготовления деталей может быть дополнена этапом эксплуатации деталей в машине. Тогда можно оценить наследственную связь параметров, характеризующих надежность эксплуатируемой детали с аналогичными параметрами, на любой операции технологического процесса. Более того, последний этап может быть разделен на определенные периоды времени.

Для рассматриваемого графа (рис.1.) имеем:

- $k_1 = \delta_i / \delta_{i+1}$ - коэффициент изменения точности (δ – допуск на размер; i - номер текущей операции или перехода; 1 – число операций или переходов сверх i , после проведения которых количественно определяется величина данного свойства);
- $k_2 = \Delta_i / \Delta_{i+1}$ - коэффициент изменения формы сечения заготовки или детали (Δ - отклонение формы);
- $k_3 = Ra_i / Ra_{i+1}$ - коэффициент изменения шероховатости (Ra - среднеарифметическое отклонение профиля);
- $k_4 = \sigma_i / \sigma_{i+1}$ - коэффициент изменения напряжений поверхностных слоев (σ - напряжения в поверхностных слоях);
- $k_5 = HB_i / HB_{i+1}$ - коэффициент изменения твердости материала (HB - твердость по Бринеллю);
- $k_6 = h_i / h_{i+1}$ - коэффициент изменения волнистости (h - высота волны);
- $k_7 = HV_i / HV_{i+1}$ - коэффициент изменения структуры поверхностных слоев (HV - микротвердость по Виккерсу).

Коэффициенты характеризуются простыми дробями, у которых числитель указывает на количественное выражение величины, отражающей свойство до проведения соответствующей операции, а знаменатель - после ее проведения.

Индекс передачи представляет собой обычно трехзначную цифру. Поскольку все свойства заготовки или детали занумерованы, равно как и операции технологического маршрута (рис.1.), индексы расшифровываются следующим образом: 1-я цифра - характеристика определенного свойства заготовки или детали; 2 и 3-я цифры - наименование или номер предыдущей и последующей операций, на которых проявляется наследственность.

Для более сложных случаев наследственности индексы передач могут состоять из четырех цифр. Так, передача k_{2014} означает, что форма (2) сечения заготовки (0) после черновой лезвийной обработки (1) определяется напряжениями поверхностных слоев (4).

Двухзначные индексы свойств x расшифровываются следующим образом; 1-я цифра - характеристика определенного свойства заготовки или детали; 2-я цифра - наименование или номер операции, на которой или после которой определяется данное свойство. Так, x_{37} - шероховатость (3) детали на сборке (7).

Поскольку на качество детали решающее влияние оказывают не все, а отдельные ее свойства, то для выявления картины наследования этих свойств це-

лесообразно строить обособленные каскадные графы (рис.2.). На основании графа технологического процесса (рис.1.) можно построить граф для установления наследственных связей по любому параметру детали. Так, наследование отклонений формы поперечного сечения (2) от заготовки (0) до сборки (7) одной из деталей представляется каскадным графом (рис. 2а).

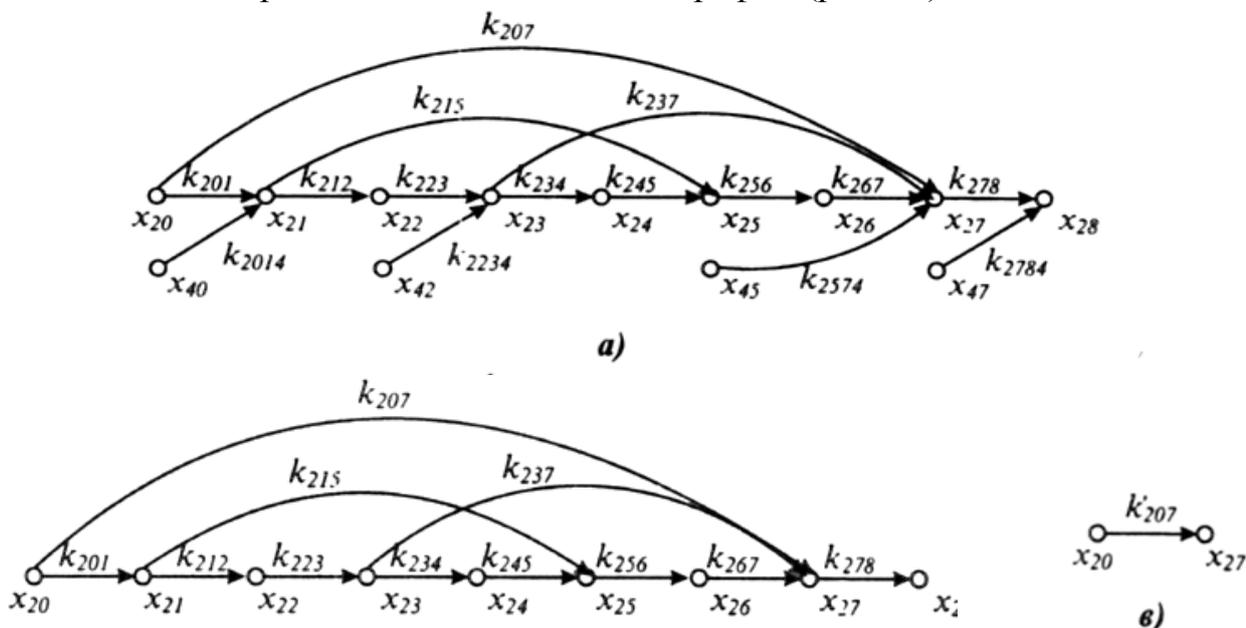


Рис. 2. Каскадные графы: а - исходный; б - упрощенный; в – приведенный.

В соответствии с изображением (рис.2а) технологическое наследование отклонений формы деталей представляется системой уравнений:

$$\begin{aligned}
 x_{21} &= \frac{1}{K_{201}} x_{20} \left[\frac{1}{K_{2014}} x_{40} \right], \\
 x_{22} &= \frac{1}{K_{212}} x_{21}, \\
 x_{23} &= \frac{1}{K_{223}} x_{22} + \left[\frac{1}{K_{2234}} x_{42} \right], \\
 x_{24} &= \frac{1}{K_{234}} x_{23}, \\
 x_{25} &= \frac{1}{K_{245}} x_{24} + \frac{1}{K_{215}} x_{21}, \\
 x_{26} &= \frac{1}{K_{256}} x_{25}, \\
 x_{27} &= \frac{1}{K_{267}} x_{26} + \frac{1}{K_{237}} x_{23} + \frac{1}{K_{207}} x_{20} + \left[\frac{1}{K_{2574}} x_{45} \right], \\
 x_{28} &= \frac{1}{K_{278}} x_{27} + \left[\frac{1}{K_{2784}} x_{47} \right].
 \end{aligned}$$

Более простому случаю наследования, когда не учитывается взаимное влияние различных свойств (рис. 2 б), соответствует система уравнений, в которой отсутствуют слагаемые в квадратных скобках.

Для нахождения значений x_{i+1} воспользуемся первыми $(i + 1)$ уравнениями и приведенным графом (рис. 2 в), дающим x_{i+1} в функции от x_i

Искомая передача $k'_{207} = x_{20}/x_{27}$ - определяется методом подстановки:

$$x_{27} = x_0 \left\{ \frac{1}{k_{212}} \frac{1}{k_{201}} \left[\frac{1}{k_{256}} \left(\frac{1}{k_{223}} \frac{1}{k_{234}} \frac{1}{k_{245}} \right) + \frac{1}{k_{237}} \frac{1}{k_{223}} \right] + \frac{1}{k_{207}} \right\}.$$

В системе, имеющей обратную связь (рис.3), передача устанавливается

подстановкой $x_3 = x_2/k_2$ в $x_2 = x_1/k_1 + x_3/k_3$, и оказывается равной:

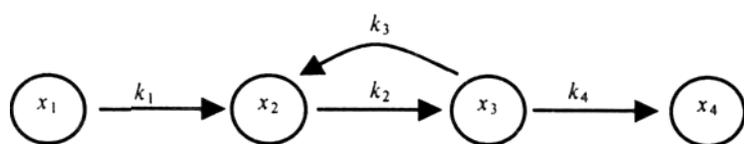


Рис. 3. Граф системы с обратной связью.

$$\frac{x_1}{x_2} = k_1 \left(1 - \frac{1}{k_2 k_3} \right),$$

где $1 - 1/(k_2 k_3)$ – коэффициент обратной связи, на который нужно умножить передачу k_1 , чтобы выявить полное влияние технологических и эксплуатационных воздействий на формирование свойства.

Предлагаемый подход к управлению качеством деталей позволяет установить наследственные связи по любому параметру детали и выявить полное влияние технологических и эксплуатационных воздействий на формирование свойств детали.

Литература: 1. Шухгальтер Л.Я. Управление качеством машин. М.: Машиностроение, 1977. 96 с., 2. Технологические основы обеспечения качества машин / К.С. Колесников, Г.Ф. Баландин, А.М. Дальский и др. М.: Машиностроение, 1990. 256, 3. Ящерицын П.И., Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. М.: Наука и техника, 1977. 256 с., 4. Роботнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел. М.: Наука, 1977. 383 с., 5. Технология машиностроения: В 2 т. Т. 1. Основы технологии машиностроения / Под ред. А.М. Дальского. М.: МГУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 564 с.

УДК 621.923

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ, ГОМОГЕНИЗАЦИИ И НАГРЕВА ЖИДКОСТИ

Фесенко А.В., канд. техн. наук, **Любимый Ю.Н.**, (г. Харьков, Украина)

Choice of vehicles facilities and technologies of preparation of lubricating-cooling liquids on the basis of analysis of distributing of energy in the working area of hydrodynamic cavitation options.

Выбор методов и технологий приготовления, восстановления СОЖ и других технологических эмульсий оказывают влияние на трудоемкость и энергозатраты вспомогательного производства машиностроительных предприятий. При приготовлении таких эмульсий используются различные устройства, обеспечивающие перемешивание, нагрев, гомогенизацию и диспергирование. Кроме

мешалок, баков с барботацией паром, нагревом в емкостях в настоящее время все большее применение находят технологии с использованием гидродинамических [1] и других устройств, в которых выполняется кавитационная обработка потока рабочей среды [2].

Для правильного выбора аппаратных средств, технологий приготовления СОЖ и других эмульсий необходимы общие критерии оценки эффективности таких устройств.

Применяемые гидродинамические системы при обработке жидких сред можно разделить на три группы: дезинтеграторы, гидродинамические гомогенизаторы (диспергаторы) и гидродинамические устройства, используемые для нагрева жидкости (теплогенераторы).

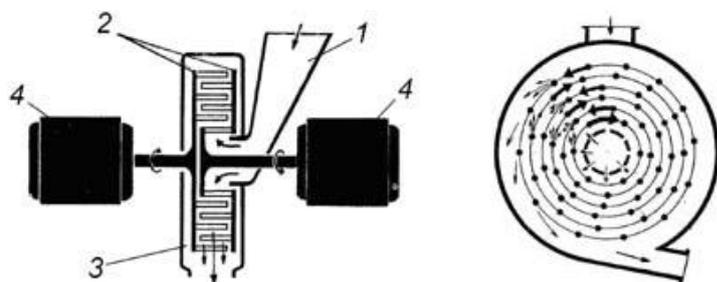


Рис. 1. Дезинтегратор.

продукта о поверхность пальцев, зубьев, пластин или других выступающих деталей. На рис. 1 показан дезинтегратор с двумя роторами, вращающимися навстречу друг другу. Обрабатываемый продукт поступает по загрузочному каналу 1 в рабочую зону с роторами 2, расположенными в корпусе 3. В таких устройствах, как правило, используются два электродвигателя 4. В данной конструкции на роторах установлены цилиндрические пальцы. Считается, что наибольшая кинетическая энергия достигается путем встречных ударов при больших скоростях.

В таких устройствах происходит интенсивное перемешивание, измельчение, диспергация, механическая активация, но в них не происходит значительного нагрева, что указывает на недостаточную диссипацию энергии, т.е. превращение механической энергии в тепловую.

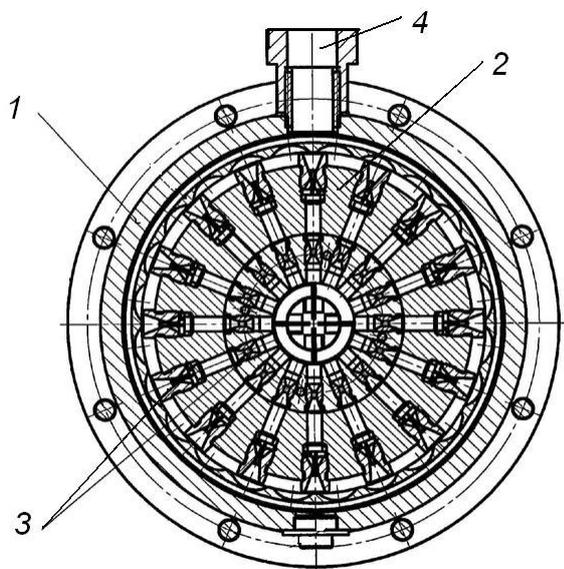


Рис. 2. Рабочая зона аппарата первого класса (РКА-03).

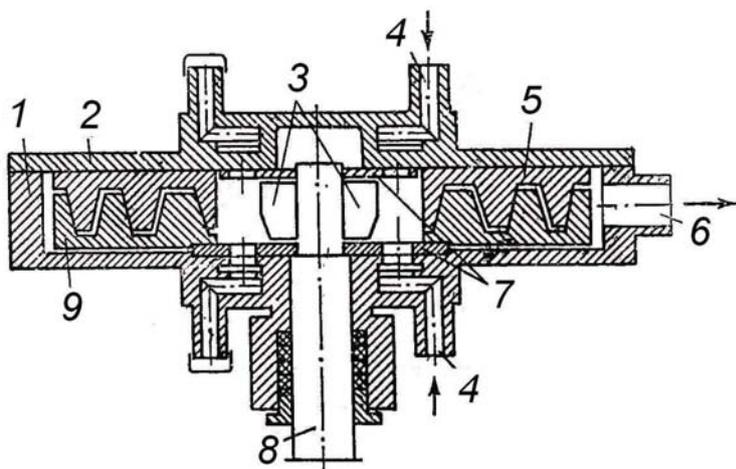
Принцип работы дезинтегратора основан на воздействии рабочих органов на обрабатываемый продукт при вращении элементов различной конфигурации с большими угловыми скоростями. При этом происходят удары обрабатываемого

продукта о поверхность пальцев, зубьев, пластин или других выступающих деталей. На рис. 1 показан дезинтегратор с двумя роторами, вращающимися навстречу друг другу. Обрабатываемый продукт поступает по загрузочному каналу 1 в рабочую зону с роторами 2, расположенными в корпусе 3. В таких устройствах, как правило, используются два электродвигателя 4. В данной конструкции на роторах установлены цилиндрические пальцы. Считается, что наибольшая кинетическая энергия достигается путем встречных ударов при больших скоростях.

В гомогенизаторах и диспергаторах используются разные способы воздействия на рабочую среду. Гидродинамические роторные аппараты по характеру воздействия на рабочую среду можно разделить на два основных класса. К первому относятся устройства (рис.2), в которых разгон жидкости выполняется в закрытых радиальных или других по форме ка-

налах ротора 2 с последующим выходом на кавитирующие элементы 3. При этом кинетическая энергия движения жидкости расходуется на создание рабочего напора на выходе 4 и на преодоление сопротивлений в рабочей зоне 1. В таких аппаратах при установке уплотнений практически нет возврата обрабатываемой среды на вход ротора.

Ко второму классу относятся роторно-пульсационные аппараты (РПА). В этих устройствах изменяется характер воздействия на рабочую среду. Он обусловлен конструктивной особенностью рабочих органов РПА – чередующимися неподвижными и вращающимися цилиндрами или конусами с перфорацией в виде прорезей или отверстий. При этом воздействие на поток жидкотекучей обрабатываемой среды обеспечивается путем принудительного перекрытия каналов его течения в системе вращающегося ротора и неподвижного статора. В этом случае при малых зазорах в сопряжении рабочих элементов кроме кавитационного эффекта в продукте возникают значительные сдвиговые напряжения, что интенсифицирует процесс обработки. На рисунке 3 показан РПА [2] с раздельным вводом 4 смешиваемых и диспергируемых компонентов. Корпус 1 прикрыт крышкой 2. На валу 8 установлены лопасти 3 для разгона жидкости. На корпусе установлен статор 5, относительно которого вращается ротор 9. Выход готового продукта выполняется через канал 6.



Гидродинамические аппараты и первого, и второго классов - проточного типа и кроме диспергирующего эффекта дополнительно обладают насосными качествами, а также за счет возникновения сил диссипативного трения в них происходит нагрев обрабатываемого продукта

Рис. 3. Рабочая зона аппарата второго класса – РПА.

Наиболее удобным параметром, определяющим

уровень воздействия на рабочую среду является количество энергии, затрачиваемой на процесс и ее распределение в аппарате [1]. В рассматриваемой системе кинематическая энергия движения жидкости при вращении ротора кроме создания гидравлического напора на выходе аппарата переходит в тепло и изменение физико-химического состояния рабочей среды.

Диссипация энергии происходит за счет сил сопротивления в рабочей зоне диспергатора, и зависит от конструкции элементов рабочей зоны и режимов обработки. Баланс энергии в рабочей зоне диспергатора имеет вид:

$$W_e = W_a + W_{a\dot{\alpha}} + W_\delta, \quad (1)$$

где W_e – кинетическая энергия жидкости, движущейся в рабочей зоне; W_a – энергия, затрачиваемая на создание давления и перемещение рабочей среды в каналах, определяется гидравлической мощностью диспергатора и потерями на

возврат потока ко входу ротора; $W_{\dot{a}i}$ – внутренние потери энергии на трение в межцилиндровых, радиальных и осевых зазорах; $W_{\dot{o}}$ – энергия, затрачиваемая на перемешивание, гомогенизацию и кавитационную обработку рабочей среды.

Электроэнергия потребляемая из сети переменного тока при работе диспергатора также расходуется на электрические и механические потери в системе. Тогда полный баланс энергетических затрат определяется зависимостью:

$$W_{\dot{y}\dot{a}} = W_{\dot{e}} + W_{\dot{i}\dot{y}} + W_{\dot{i}i} \quad (2)$$

где $W_{\dot{y}\dot{a}}$ – энергия, потребляемая электродвигателем из сети; $W_{\dot{i}\dot{y}}$ – потери энергии в электродвигателе; $W_{\dot{i}i}$ – потери энергии на преодоление сопротивления в элементах конструкции диспергатора, т.е. механические (внешние) потери энергии.

Рассмотрим структурную схему энергопотребления в РПА. Энергию, потребляемую приводом РПА из сети ($W_{\dot{y}\dot{a}}$) укрупнено можно разделить на два потока. Первый ($W_{\dot{i}\dot{a}}$) – это потери энергии в электродвигателе и в механизмах установки. Эти потери определяются по мощности холостого хода без заполнения аппарата рабочей средой.

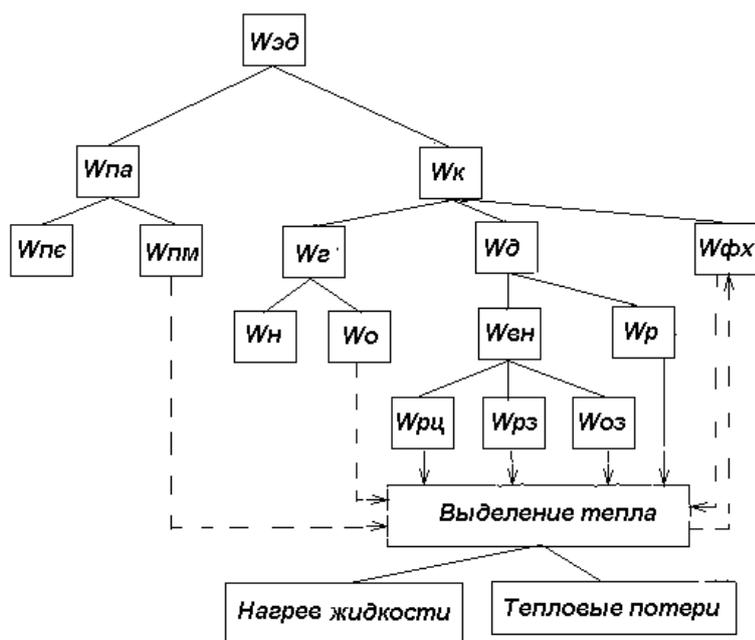


Рис. 4. Структура затрат энергии в РПА.

Второй поток ($W_{\dot{e}}$) – это кинетическая энергия движущейся жидкости, которая, в свою очередь, разделяется на гидравлическую ($W_{\dot{a}}$) и диссипативную ($W_{\dot{a}}$) и энергия, затрачиваемую на изменение физико-химического состояния рабочей среды ($W_{\dot{o}\dot{o}}$). Количество гидравлической энергии, определяется напором жидкости на выходе из аппарата ($W_{\dot{i}}$) и энергией, затрачиваемой на возврат потоков в рабочих пазах системы «ротор-статор» ($W_{\dot{i}}$).

Диссипативная энергия ($W_{\dot{a}}$) затрачивается на кавитацию, диспергирование, перемешивание ($W_{\dot{o}}$) и на внутренние потери ($W_{\dot{a}i}$), включающие в себя трение жидкости в межцилиндровых зазорах ($W_{\dot{o}\dot{o}}$), дисковое трение в радиальном ($W_{\dot{o}\dot{c}}$) и осевом ($W_{\dot{i}\dot{c}}$) зазорах между ротором и корпусом [3]. При этом в рабочей зоне аппарата происходит выделение тепла, которое уносится с потоком, а также передается на элементы конструкции и в окружающую среду. На нагрев жидкости оказывают влияние механические потери и возврат жидкости, но их вклад незначителен. При изменении физико-химического состояния рабочей среды ($W_{\dot{o}\dot{o}}$) тепло может, как выделяться, так и поглощаться.

Перераспределение энергии в аппарате происходит при изменении параметров рабочей зоны (зазора) и параметров потока жидкости по производительности и давлению (разрежению). Кроме того, рабочая среда на выходе из аппарата может изменить свое физико-химическое состояние, которое определяется в зависимости от технологических условий (требований) обработки.

Если при работе в диспергаторе не изменяются параметры рабочей зоны и обработка выполняется при постоянных оборотах ротора, то $N_{i\dot{y}} + N_{i\dot{i}} \approx const$.

В аппаратах первого типа при обработке определенной жидкости с постоянными оборотами ротора внутренние потери (W_{ai}) изменяются незначительно. В РПА изменение зазора между ротором и статором существенно влияют на сопротивление в рабочей зоне, что сказывается на перераспределении энергии. В обоих случаях динамика изменения тепловых процессов в основном зависит от энергии диссипации (W_a).

Затраты мощности на нагрев жидкости, проходящей через диспергатор, определяются зависимостью:

$$N_{\delta} = K_{\delta} \cdot Q \cdot (T_1 - T_2) \cdot T_{\delta} \cdot \rho \quad (\text{кВт}), \quad (3)$$

где Q – расход жидкости, проходящей через диспергатор ($\text{м}^3/\text{час}$); T_1 и T_2 – температура жидкости на входе и выходе диспергатора в (град.С); T_{δ} – теплоемкость рабочей среды ($\text{Ккал/кг}\cdot\text{град.С}$); ρ – плотность жидкости (кг/м^3); K_{δ} – коэффициент соответствия размерностей (для воды $K_{\delta} = 1,164$).

Сравнение объемной интенсивности нагрева для определенной жидкости без учета потерь определяется текущим значением производительности диспергатора (Q) и разностью температур на входе и выходе ($\Delta T = T_2 - T_1$):

$$K_c = Q \cdot \Delta T \quad (\text{м}^3 \cdot \text{град/час}). \quad (4)$$

Расчет тепловой нагрузки аппарата для разных жидкостей можно выполнить с помощью зависимости:

$$K_{\omega} = Q \cdot \Delta T \cdot \rho \cdot T_{\delta} \quad (\text{ККал/час}). \quad (5)$$

Оценку эффективности тепловых характеристик кавитационной обработки

определенной жидкости в диспергаторе выполняется по двум критериям: эффективности тепловыделения (K_{ω}) и теплонпряженности процесса (K_{δ}):

$$K_{\delta} = \frac{N_{\delta}}{N_{y\delta}}, \quad (6)$$

где $N_{y\delta} = N_{y\dot{a}} - N_{\delta\delta} = N_{y\dot{a}} - (N_{y\dot{i}} + N_{i\dot{i}})$.

В теплогенераторах типа «Торнадо» (Рис.5) жидкость поступает в торцевой зазор с одной стороны ротора, а выходит с другой (на рисунке показано стрелками) [4]. В этом случае разогрев жидкости происходит

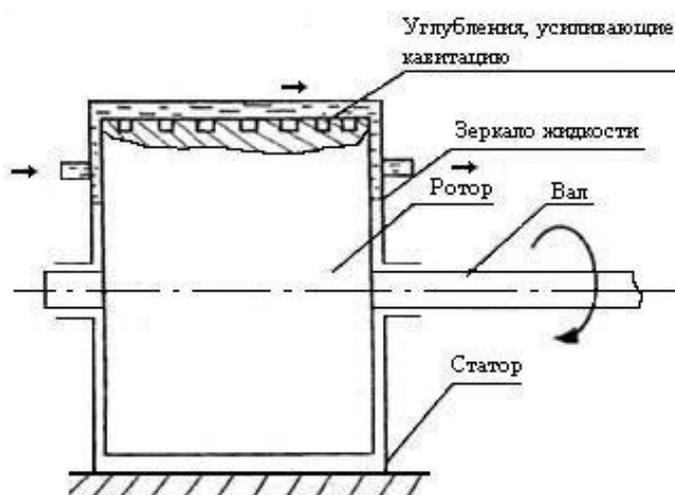


Рис. 5. Схема работы теплогенератора типа «Торнадо».

при кавитации в радиальном зазоре между ротором и статором. Распределение энергии будет несколько другим. Основное сопротивление будет в радиальном зазоре, именно здесь будет происходить диссипация энергии.

В этом случае при определенном диаметре ротора и постоянной частоте вращения интенсивность нагрева определяется геометрией профиля на цилиндрической поверхности ротора и величиной зазора. И сопротивление, и кавитация, в зазоре взаимно перераспределяясь, определяют интенсивность выделения тепла. В такой конструкции теплогенератора затраты энергии на подачу жидкости незначительны, т.к. расход небольшой. Электрические и механические потери определяются аналогично предыдущим случаям, по мощности холостого хода. Расчетные зависимости будут такими же, как и при анализе рассмотренных выше устройств.

В конечном итоге интенсивность нагрева определенной массы жидкости, залитой в систему, при работе в течении времени τ рассчитывают по формуле:

$$W_0 = 4,19 \cdot Q_{\text{акт}} \cdot \rho \cdot (T_2 - T_1) \cdot T_m \cdot \frac{60}{\tau} \text{ (кВт*час)}, \quad (7)$$

где $Q_{\text{акт}}$ – объем жидкости в баке (m^3).

Для определения энергии, затрачиваемой на нагрев металла (N_i) установки с приведенной массой M_0 удельной теплоемкостью T_0 , воспользуемся замером температур на корпусе диспергатора в начальный (T_{i1}) и конечный (T_{i2}) моменты времени. Воспользуемся аналогичной формулой:

$$W_i = 4,19 \cdot M_0 \cdot (\dot{O}_{i2} - \dot{O}_{i1}) \cdot T_0 \cdot \frac{60}{\tau} \text{ (кВт*час)}. \quad (8)$$

В системе, конечно, будут потери за счет передачи тепла в окружающую среду, но при хорошей теплоизоляции бака и теплогенератора они будут незначительны.

В конечном итоге суммарная энергия W_c , затраченная на выделение тепла в установке за время τ , будет равна:

$$W_c = W_0 + W_i \text{ (кВт*час)}. \quad (9)$$

За это же время затраты эффективной энергии составляют:

$$W_{\text{эф}} = N_{\text{эф}} \cdot \tau / 60 \text{ (кВт*час)}. \quad (10)$$

Эффективность работы теплогенератора на бак определяется затратами энергии на обработку жидкости и энергией тепловыделения в системе:

$$K_a = W_n / W_{\text{эф}}. \quad (11)$$

Предложенная методика, основанная на сравнении затрат энергии в рабочей зоне гидродинамической кавитационной установки, позволяет выполнить анализ аппаратных средств, технологий приготовления СОЖ и других производственных смесей по интенсивности воздействия на обрабатываемую среду. Приведенные расчетные зависимости могут использоваться также при определении оптимальных режимов работы других гидродинамических кавитационных устройств.

Литература: 1. Фесенко А.В. Методика оценки параметров кавитационной обработки СОЖ // Вестник национального технического университета «ХПИ», сборник научных работ. Тематический выпуск: Технологии в машиностроении вып. – Харьков: изд. НТУ «ХПИ», – 2008. – №1. стр. 14-18. 2. Богданов В.В., Христофоров Е.И., Клоцунг Б.А. Эффективные малообъемные смесители. – Л.: Химия, 1989. – 224 с. 3. Червяков В.М. Гидродинамические и кавитационные яв-

ления в роторных аппаратах : монография / В.М. Червяков, В.Ф. Юдаев. – М.: Машиностроение - 1, 2007. – 128 с. 4. Б.М. Посметный, Ю.И. Горпинко. Сверхединичные теплогенераторы роторных конструкций // Сборник докладов НТК «Аномальные физические явления в энергетике и перспективы создания нетрадиционных источников энергии. – Харьков, 2005. - стр. 268 -277.

УДК 330. 338.94.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ АКТИВИЗАЦИИ ИНВЕСТИЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Смоловик Р.Ф., канд. экон. наук, **Коротун О.В.**, **Старов В.В.**

(г. Харьков Украина)

In article are analyzed efficiency of use of the investment project in the conditions of small and average business with preliminary an estimation on a design stage, allows to choose the optimum decision.

Введение. В современных условиях кризисной ситуации, нестабильного финансового рынка возникает необходимость поиска перспективных направлений того вида производства товаров и услуг, где наиболее эффективно могут быть использованы инвестиционные ресурсы. К таким приоритетным сферам можно отнести, прежде всего, малый и средний бизнес при производстве товаров народного потребления, жилищного строительства, переработки сельскохозяйственного сырья и др.

Постановка задачи. На протяжении последних лет, в связи с значительным темпом инфляции, уменьшается часть долгосрочных кредитов, предоставленных субъектам хозяйствования всех форм собственности в общем объеме кредитов направляемых в развитие экономики страны.

Цель статьи состоит в том, чтобы проанализировать эффективность использования пилотного инвестиционного проекта в условиях предпринимательской деятельности при возможности использования нескольких вариантов распределения планируемых доходов и затрат и выбора оптимального из них.

Мы исходим из того положения, что в условиях экономического кризиса, необходимо ориентировать инвестиционную деятельность на те предприятия, которые, даже в сложных условиях экономической ситуации, остаются прибыльными.

Эффективность инвестиционной политики определяет состояние производства, положение и уровень технической оснащенности основных фондов предприятий народного хозяйства, возможности структурной перестройки экономики, решение социальных и экологических проблем. Инвестиции являются основой для развития предприятий, отдельных отраслей и экономики страны в целом. Однако по причине экономического кризиса инвестиционная деятельность в Украине значительно снизилась. Спрос на инвестиции падал значительно быстрее, чем производство валового национального продукта. Одной из причин этого, было то, что инфляция значительно обесценивала инвестиционные средства. Кроме того, у коммерческих банков отсутствуют экономические стимулы кредитования производственных инвестиций, при наличии повышенного риска в процессе предоставления таких кредитов, своевременное возвращение которых - слишком проблематично.

Как показывает практика экономически развитых стран, важнейшее усло-

вие активизации инвестиционной деятельности – снижение темпов инфляции. Практический опыт указанных выше стран определяет момент наступления финансовой стабилизации при средних темпах роста цен ежемесячно не более 2.8%. Если увеличивать финансовую стабильность рынка, снижать тяжесть налоговых обязательств, то, даже в этом случае, возникает необходимость принятия взвешенного решения не только об абсолютной величине инвестиций, но и возможных альтернативных вариантов их получения. В связи с этим возникает необходимость различной глубины аналитической проработки экономической оценки эффективности использования инвестиций и выбора оптимального варианта. Кроме того, весьма существенным в этих условиях является еще и фактор риска, поскольку инвестиционная деятельность всегда осуществляется в условиях неопределенности, степень которой может значительно возрасти.

Следовательно, выбор инвестиционной стратегии предприятия должен базироваться на взвешенной оценке и анализе преимуществ и недостатков каждой из них. Так, например, для предприятий, находящихся в сложном финансовом положении может быть использована стратегия, направленная на решение задач улучшения качества, снижения себестоимости продукции. Для благополучных, с финансовой точки зрения, предприятий - инвестирование финансовых ресурсов в инновационные технологии. Для очень успешных предприятий – вкладывать значительные финансовые ресурсы в инновационные процессы для обеспечения лидирующих позиций на рынке.

Формирование необходимых инвестиционных ресурсов, обеспечивающих финансирование инвестиционной деятельности предприятия, входит в систему стратегических целей его развития. Для обеспечения эффективного управления этим процессом на предприятии разрабатывается обычно специальная инвестиционная политика, направленная на формирование инвестиционных ресурсов из различных источников их получения в соответствии с прогнозируемым планом развития. Политика формирования инвестиционных ресурсов представляет собой часть общей инвестиционной стратегии предприятия, заключающейся в обеспечении необходимого уровня самофинансирования его инвестиционной деятельности и наиболее эффективных форм привлечения заемного капитала из различных источников.

Заключительным этапом управления формированием инвестиционных ресурсов в целом по предприятию является определение конкретных источников их привлечения. Этот процесс является частью более общего процесса формирования финансовых ресурсов для обеспечения всех потребностей стратегического развития предприятия. Вместе с тем, определение источников формирования инвестиционных ресурсов предприятия имеет ряд отличительных особенностей.

Одной из таких особенностей является то, что инвестиционный процесс в рамках большинства инвестиционных проектов характеризуется довольно продолжительным периодом, что соответственно определяет и долгосрочное отвлечение финансовых средств на инвестиционные цели. Поэтому источниками формирования инвестиционных ресурсов, кроме собственного капитала, могут выступать, как правило, только долгосрочные кредиты и займы, а также финансовый лизинг. Краткосрочные заемные инвестиционные ресурсы используются в процессе инве-

стиционной деятельности, как правило, в условиях малого и среднего бизнеса.

В странах Европы малый и средний бизнес составляет основу экономики. Известно, что в странах Евросоюза большую часть работ и услуг выполняют именно субъекты малого предпринимательства. Это и не удивительно – так как такие предприятия легче, чем большие, поддаются управлению, требуют меньше затрат на перестройку производства, а также быстрее ориентируются в условиях изменения потребностей рынка. Малое предприятие для организации предпринимательской деятельности требует небольших капитальных вложений, а поэтому может быть организовано «практически» каждым гражданином страны. Кроме того такие предприятия больше приспособлены к различным видам инновационной деятельности, способствуют решению проблемы безработицы, увеличивая уровень занятости населения.

Как известно, инвестиционные проекты имеют различные цели, обеспечивающие: прирост объема выпуска продукции; расширение (обновление) ассортимента продукции; повышение качества; снижение себестоимости продукции; решение социальных, экологических и других задач. Однако в условиях малого бизнеса инвестиционный проект должен решать, практически, весь указанный выше комплекс задач.

Поэтому в целях снижения уровня риска возможность осуществления инвестиционной деятельности должна базироваться на инвестиционной привлекательности малого бизнеса, т.е. необходимо дать ответ на вопрос о целесообразности вложения финансовых ресурсов в данное предприятие. Инвестиционная привлекательность зависит от многих показателей, характеризующих результаты хозяйственной деятельности, однако инвесторов интересуют, как правило, показатели, определяющие доходность капитала, курс акций, уровень дивидендов. В связи с этим, с точки зрения инвестиционной привлекательности важен такой показатель, как рентабельность активов предприятия. Это одна сторона проблем. Другая – оценка и анализ эффективности нескольких возможных вариантов использования инвестиций и выбора оптимального из них. Данная задача решалась применительно к предприятию, которая специализируется на производстве молодежной женской и мужской одежды.

Философия, цель деятельности предприятия - производство товаров исключительного качества для удовлетворения потребностей покупателя: «Прекрасные вещи для Вас; только в салоне у нас; Стильно, модно, доступно; мы производим одежду для Вас - которую носим с удовольствием сами!»

Предприятие основано в 2007 году. За прошедший период завоевало репутацию стильного, молодежного, динамично развивающегося предприятия. При изготовлении моделей используется опыт ведущих изготовителей подобной продукции стран: России, Украины и Турции, а также учитываются тенденции сложившиеся на внутреннем украинском рынке. Небольшие объемы производства позволяют быстро реагировать на потребности рынка и встречать новый сезон с коллекциями в которых представлены как классические, так и ультрамодные модели. Готовая продукция сертифицирована с 2008 года, так как была разработана и внедрена система качества в соответствии с международными стандартами качества ISO 9001. Предприятие получила сертификаты

подтверждающие, обеспечение качества работ на всех этапах производственного цикла, от получения сырья до реализации готовых изделий.

Задачу увеличения объема производства продукции предприятие реализует путем более детального изучения спроса потребителей и завоевания новых сегментов рынка. Предприятие довольно активно и успешно использует, такой фактор маркетинговой стратегии, как Public Relation. Особенно активно использует различные методы маркетинга: праздники, которые обычно сопровождаются концертами, конкурсами и розыгрышами различных призов. Таким образом предприятие стремится формировать позитивное отношение потребителей как к предприятию, так и своей торговой марке. Поэтому обновление ассортимента продукции, изготовление высококачественных новинок является одним из приоритетных направлений бизнес - стратегии компании.

За пять месяцев 2009 года объем реализации новых изделий вырос на 47% по сравнению с первым полугодием прошлого года, что составляет - 46 млн.грн.. Однако, для цели изготовления новой торговой марки и наращивания объемов продаж, предприятию необходимы инвестиции для приобретения современного оборудования. Показатели характеризующие финансовую стойкость и ликвидность предприятия (табл. 1), позволяют сделать вывод: - предприятие является инвестиционно привлекательным.

Таблица 1

Показатели ликвидности и финансовой стойкости

Наименование	На конец 2009 года	На перспективу 2010 года	Нормативное значение
Показатели общей ликвидности,	2,1	2,3	>2
Показатели быстрой ликвидности	0,78	0,91	1-0,5
Показатели абсолютной ликвидности	0,3	0,4	0,5-0,02

Анализ эффективности альтернативных вариантов инвестиционного проекта производился на основе расчета показателей (табл. 2): чистой текущей приведенной стоимости- NPV; внутренней нормы прибыли – IRR; срока окупаемости инвестиций.

Таблица 2

Показатели эффективности проекта.

Найменування	Варіант 1	Варіант 2
чистой текущей приведенной стоимости - NPV	14	49
внутренней нормы прибыли - IRR	35,4	15,3
сроку окупаемости, лет	3	4

Все показатели эффективности использования инвестиционного проекта (табл. 2), позволяют сделать следующие выводы: по показателю чистой текущей приведенной стоимости более выгодным является второй вариант проекта, а по внутренней норме прибыли и сроку окупаемости – первый.

Для первого варианта распределение доходов и затрат инвестиционного проекта был определен безубыточный объем производства продукции:

$$N_{б.у.} = \frac{ПЗ}{Ц - а}$$

где ПЗ - постоянные предпроизводственные затраты, равные инвестициям, тыс.грн; Ц - цена условного комплекта готовой продукции, тыс.грн.; а – переменные элементы себестоимости продукции, тыс.грн.

Согласно проведенным расчетам безубыточный объем производства продукции составил 93 комплекта. Затем было проанализировано его изменения при изменении конъюнктуры рынка: так, например, при снижении цены продукции на 10% безубыточный объем производства составит 113 комплектов; при снижении переменных элементов себестоимости на 10% безубыточный объем производства составит 86 комплектов; при снижении инвестиций на 10% безубыточный объем производства составит 83 комплекта при одновременном действии всех факторов рынка – 93 условного комплекта продукции.

Следовательно, главным фактором влияющим на снижение безубыточного объема производства продукции, являются инвестиционные ресурсы для дальнейшего развития предпринимательской деятельности.

Выводы. В условиях экономического кризиса, на наш взгляд, важно ориентировать инвестиционную деятельность на те предприятия, которые, даже в сложных условиях экономической ситуации, остаются прибыльными.

Тогда, заключительным этапом в указанном анализе будет являться процесс управления формированием инвестиционных ресурсов в целом по предприятию с учетом конкретных источников их формирования.

Однако, для решения указанных задач, необходимо анализировать финансовое состояние предприятия, с точки зрения его инвестиционной привлекательности. Если предприятие удовлетворяет требованиям инвестора, то необходимо производить расчет эффективности использования инвестиционных ресурсов на основе анализа нескольких альтернативных вариантов инвестиционных проектов с целью выбора оптимального решения.

Литература: 1. Егорова Н.Е., Мати Е.Р. Малый бизнес в России: экономический анализ и моделирование. – М.: ЦЭМИ РАН, ИСЭПП РАН, 2001.- 56с. 2. Василевский А.К. Экономическая ситуация в Украине и необходимость коррекции рыночных реформ // В кн.: Проблемы трансформации экономики и формирование социально-экономической модели Украины (материалы научно-методического семинара). – Днепропетровск: ДГУ. – 2005. 3. Вислова А.В. Рентабельность или окупаемость // Справочник экономиста. - 2008. - № 10. - С. 54-55.

УДК 330. 338.45.

К ВОПРОСУ АНАЛИЗА НЕКОТОРЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФОНДОВ ПРЕДПРИЯТИЯ

Смоловик Р.Ф., канд. экон. наук, Коротун О.В., Оджаров О.Н.

(г. Харьков, Украина)

In article various approaches to process обопачиваемости costs of production assets and its influence on increase of an overall performance of the enterprise are analyzed.

Введение. В современных условиях кризисной ситуации перед каждым промышленным предприятием, в независимости от форм собственности, возникает задача поиска финансовых ресурсов для цели развития предприятия.

Следовательно, поиск инвестиционных ресурсов занимает одно из главных мест в процессе принятия управленческих решений по инвестированию в связи с возникновением нескольких негативных альтернатив: ограниченность финансовых ресурсов доступных для инвестирования; риск взаимосвязанный с принятием того, или иного решения по процессу инвестирования.

В связи с этим возникает необходимость поиска внутренних резервов повышения эффективности использования основных средств предприятия.

Постановка задачи. Решению указанных выше задач на наш взгляд, могут способствовать резервы производства тех его элементов от которых зависит продолжительность оборота стоимости основных средств предприятия.

Поскольку продолжительность одного оборота, скорость оборота стоимости основных фондов влияет на масштабы, пропорции процесса их воспроизводства, темпы и эффективность развития всего производства.

Как фактор эффективности общественного производства скорость оборота необходимо, на наш взгляд, анализировать по следующим направлениям: изменение объёмных показателей процесса производства, к которым можно отнести: валовой общественный продукт (ВВП); прибыль, национальный доход; частные показатели эффективности такие как: фондоотдача, эффективность капитальных вложений, рентабельность; кроме того, можно использовать и такие показатели как: снижение затрат на производство продукции как общих, так и отдельно-материальных и трудовых.

Анализ указанных выше показателей основан на существовании прямой взаимозависимости между скоростью оборота стоимости производственных фондов, объёмом производства продукции и прибылью.

Скорость оборота, исчисленная в денежном выражении, показывает с какой интенсивностью потребляются средства производства, с какой скоростью создаётся и доставляется готовый продукт к потребителю, каков период восстановления фондов в новой вещественной форме.

Обычно применяются следующие формулы исчисления общей скорости оборота стоимости производственных фондов:

$$K_o = \frac{S}{F},$$

где K_o – количество оборотов стоимости производственных фондов за год; S – объём произведённой продукции по себестоимости; F – среднегодовой объём авансированных фондов, грн.

$$O_d = \frac{360 \text{ дней}}{K_o},$$

где O_d – длительность одного оборота, дни.

Количество оборотов производственных фондов показывает, сколько раз, в среднем они полностью израсходовались и восстановились за тот или иной промежуток времени; сколько раз произошло превращение авансированной стоимости в издержки производства и реализации продукции; сколько раз стоимость производственных фондов превратилась в продукцию.

Динамика изменения фондоотдачи в зависимости от изменения количе-

ства оборотов производственных фондов и уровня рентабельности (таблица 1, рисунок 1) позволяет сделать вывод, что при увеличении количества оборотов с одного до пяти в год фондоотдача возрастает более чем в 5 раз. При динамике роста прибыли до 50%, индекс роста фондоотдачи составляет всего лишь $1,75 / 1,15 = 1,05$ т.е. 5%

Таблица 1

Изменение фондоотдачи в зависимости от количества оборотов и нормы прибыли

Количество оборотов за год	Фондоотдача, грн.	Норма прибыли, %	Фондоотдача, грн.
1	1,15	10	1,15
2	1,15	20	1,30
3	3,15	30	1,45
4	4,15	40	1,60
5	5,15	50	1,75

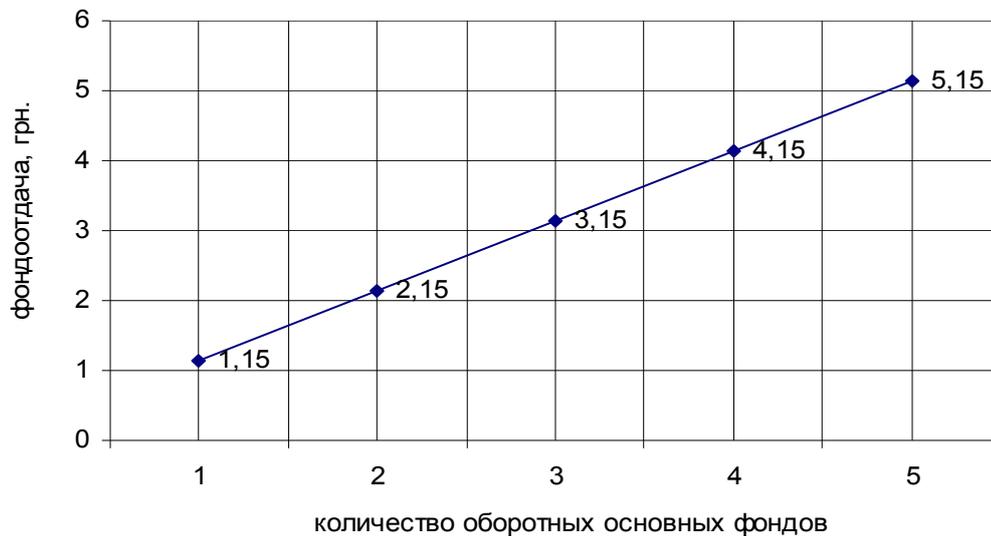


Рис. 1. Динамика фондоотдачи при изменении количества оборотов стоимости производственных фондов.

Кроме того, чем быстрее оборачиваются авансированные фонды, тем больше, при их неизменном объёме, будет произведено продукции и получено прибыли, поскольку в этом случае между ними существует прямо - пропорциональная зависимость. Так, если за один оборот фондов было получено 20 млн.грн. продукции, то за два оборота будет получено 40 млн.грн. и т.д. В разных отраслях промышленности и на предприятиях скорость оборота различна, поэтому даже при условии одинакового размера основных фондов и оборотных средств объём производимой продукции и массы прибыли будут различными.

В современных условиях, к сожалению некоторые предприятия стараются решить эту проблему лишь за счёт повышения рентабельности производства, завышая цены, изменяя номенклатуру и ассортимент путём увеличения выпуска высокорентабельных изделий и свертывания производства пользующихся

спросом недорогих товаров. В противоположность такому решению, ускоряя оборот фондов, предприятия смогут увеличить не только объём производства, но и годовую норму прибыли (P_c), поскольку: годовая норма прибыли (рентабельность) прямо пропорциональна количеству оборотов стоимости производственных фондов и среднему уровню рентабельности.

$$P_c = K_o P,$$

где P - средний уровень рентабельности продукции.

Так, если $P = 10\%$ и $K_o = 2$ оборота, то норма прибыли составляет 20% (табл. 1, рис. 2).

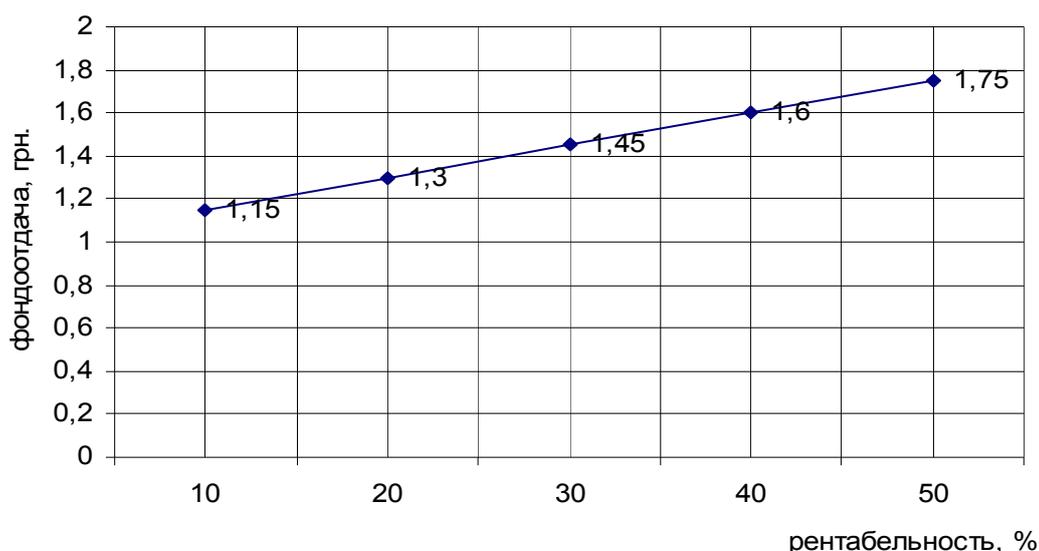


Рис. 2. Динамика фондоотдачи при изменении уровня рентабельности.

Выводы. Всё вышеизложенное позволяет сделать следующие выводы. В современных условиях кризисной ситуации возникает необходимость поиска внутренних резервов предприятия направленных на рациональное использование производственных фондов так, как их воспроизводство оказывает определяющее влияние на пропорции, темпы и долговременные тенденции развития экономики.

В этих условиях эффективность ускорения оборота стоимости производственных фондов проявляется в сокращении цикла их воспроизводства в новой натуральной форме. Однако необходимо учитывать, что повышение скорости оборота стоимости производственных фондов - сложный процесс, требующий системного подхода к его анализу. Его влияние на эффективность процесса производства неоднозначно.

Литература: 1. Вислова А.В. Рентабельность или окупаемость // Справочник экономиста. - 2008. - № 10. - С. 54-55. 2. Лысенко Д.В. Анализ прибыли и рентабельности / Д.В. Лысенко ; отзыв А.С. Кокина // Аудит и финансовый анализ. - 2007. - № 3. - С. 89-183. 3. Егорова Н.Е., Хачатрян С.Р. и др. Методы измерения взаимодействий малого и крупного бизнеса в ходе реструктуризации предприятий. М.: ЦЭМИ РАН, 2001. – 176 с. 4. Тарасенко Н.В. Економічний аналіз діяльності промислового підприємства. – 2-ге вид., стер. – К.: Алерта, 2003. – 485 с.

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ****Нежебовский В.В.** (г. Харьков, Украина)*Were grounded guidelines improve technology manufacturing gears.*

ОАО ХМЗ "Свет шахтера" является одним из основных производителей шахтных конвейеров, получивших широкое применение как у нас в Украине, так и за рубежом. Продукция завода отличается высоким качеством изготовления и конкурентоспособностью. В значительной мере это обусловлено разработкой прогрессивных конструкций приводов шахтных конвейеров (например, планетарных редукторов мощностью более 200 кВт). Для их эффективной работы предложен ряд новых конструкторских технологических решений.

В создаваемых редукторах используются различные типы зубчатых передач: конические передачи с круговым профилем зуба; конические передачи с профилем ДВВ; цилиндрические прямозубые передачи с эвольвентным зацеплением; цилиндрические косозубые передачи с эвольвентным зацеплением; цилиндрические косозубые передачи с зацеплением Новикова.

Детали зубчатых передач (валы, валы-шестерни, колеса и т.д.) изготавливаются из низкоуглеродистых легированных сталей. Они предварительно механически обрабатываются лезвийными инструментами, затем подвергаются цементации и закалке (с использованием токов высокой частоты) до твердости *HRC* 62...65, после чего окончательно обрабатываются на финишных операциях шлифования, а при необходимости – на операциях притирки абразивным порошком.

Увеличение надежности и ресурса работы редукторов достигается за счет применения подшипников с большой несущей способностью ведущих мировых производителей (фирма "SKF", Швеция; фирма "FAG", Германия), а также за счет повышения точности изготовления передач в результате применения операции шлифования поверхности зуба, применения новых высоколегированных сталей и технологий термообработки изготовленных из них деталей.

Начиная с 2001 года, на заводе применяется система программного объемного проектирования "Pro Engineer" и система для разработки и оформления конструкторской и технологической документации "Компас". Указанные системы позволили в несколько раз сократить время разработки проектов, повысить качество и точность разработок. Началом применению указанных программ послужили проекты по созданию объемных моделей конвейеров типа СПЦ230 и СП326, на базе которых начали развиваться и другие проекты.

Согласно требований конструкторских чертежей, зубчатые передачи (колеса, вал-шестерни) прямозубого и косозубого зацепления должны изготавливаться с 8-й степенью точности, вследствие чего возникла необходимость применения финишной операции обработки зубьев – зубошлифования [1]. На первой стадии работы использовались отечественные шлифовальные круги по ГОСТ 2424-80 типа 1 или 4 следующих характеристик: 400x32x127 $\alpha=40^\circ$, 24А зернистостью 10 – 6, твердостью СМ2 – С2, структурой 8, 9. Круги рассчитаны на обеспечение шероховатости поверхности R_a не более 0,63 мкм. Обработываемый материал – сталь 20Х2Н4А с твердостью *HRC*, 62-65. Припуск на обра-

ботку – 0,4–1,2 мм. Режимы правки круга: глубина резания – 0,01–0,05 мм; подача – ручная; число проходов – 3; рабочая скорость круга – не более 30 м/с. Режимы шлифования: рабочая скорость круга – не более 30 м/с; скорость заготовки – 3–4 м/мин; глубина резания – 0,4–1,2 мм; скорость подачи – 0,8–1,2 м/мин; поперечная подача – 0,05мм/дв.ход.

Применение указанных абразивных кругов на операции зубошлифовании показало на неудовлетворительные результаты, связанные с низким качеством обработки, обусловленным, прежде всего, недостаточной режущей способностью абразивных кругов. В связи с этим были применены абразивные круги производства Австрии следующей характеристики: 400x32x127 TIESPV=70⁰ V=4 9 (зерно) A₃ 40H 15VP 60W 40H/SAO 24 NOT PERMISSL BLBTOROFFNI. В качестве абразива в кругах используется синтетическая алюминиевая окись, связка – стекловидного состояния, связка наполнителя – окись.

Они отличаются лучшим качеством, что выражается в обеспечении высококачественной обработки (отсутствие прижогов и других температурных дефектов на обработанных поверхностях). При этом, срок работы австрийского круга до правки составляет 3 смены вместо одной смены при использовании отечественного круга. Срок работы австрийского круга до полного износа – 3 месяца, тогда как отечественного круга – 1 месяц.

Измерение параметров точности зубчатых колес в настоящее время производится с использованием координатно-измерительной машины GLOBAL 12. 22.10 PERFORMANCE производства фирмы DEA к. HEXAGON (Италия), работающей по программам QUINDOS и PC-DMIS и представляющей результаты в соответствии со стандартами ISO 1328–1:1995 и ISO 1328–2:1997. При освоении данной машины сравнивались основные положения действующих на заводе государственных стандартов (ГОСТ 1643-81 и ГОСТ 1758-81) и указанных выше ISO. Согласно ГОСТам, для контроля зубчатых колес можно использовать любые из перечня показателей, измерение которых может быть обеспечено технологическими возможностями и наличием контрольно-измерительных приборов и оснастки на заводе. Для степеней точности цилиндрических и конических зубчатых колес, изготавливаемых на заводе, традиционно используются следующие показатели, табл. 1.

Таблица 1

Контролируемые показатели (комплексы)

Нормы точности	Степени точности	
	8	9 – 12
	Цилиндрические передачи (ГОСТ 1643-81)	Конические передачи (ГОСТ 1758-81)
Кинематическая	F_{pr}	F_{rr}
Плавности работы	$f_{pbr} + f_{fr}$	f_{ptr}
Контакта зубьев	$F_{\beta r}$	F_{sl}, F_{sh}

В табл. 1 приняты следующие обозначения по ГОСТ: F_{pr} – накопленная погрешность шага зубчатого колеса; F_{rr} – радиальное биение зубчатого венца;

f_{pbr} – отклонение шага зацепления; f_{fr} – погрешность профиля зуба; f_{ptr} – отклонение шага зубьев; $F_{\beta r}$ – погрешность направления зуба; F_{sl} , F_{sh} – отклонение относительных размеров суммарного пятна контакта по длине и высоте зубьев (определяемого в паре конических колес с базовых установок на контрольно-обкатном станке).

До приобретения координатно-измерительной машины изготавливаемые на заводе колеса 9-й и грубее степеней точности подвергались следующему контролю: по нормам кинематической точности – прямозубые и косозубые цилиндрические колеса – на конусных оправках в центрах, а конические – в приспособлениях на радиальное биение зубчатого венца F_{rr} ; косозубые, кроме того, по нормам контакта – измерением погрешности направления зуба $F_{\beta r}$ через измерение осевого шага колес с помощью концевых мер на специальном приспособлении в центрах.

Принималось, что соответствие колес по нормам плавности работы (показатель f_{ptr}) для 9-й степени точности и грубее достаточно обеспечивается технологией за счет точности цепи деления станков. Так же и $F_{\beta r}$ у прямозубых цилиндрических колес – за счет точности установочных баз приспособлений.

Для зубчатых колес 8-й степени точности, по мере освоения их производства, был введен обязательный контроль по нормам контакта зубьев параметра $F_{\beta r}$, в том числе и прямозубых колес, а в части соблюдения норм плавности был применен косвенный контроль профиля f_{fr} специального эталонного зубчатого колеса на эвольвентомере МИЗ. Указанный эталон подвергался шлифованию зубьев каждый раз после монтажа и выставления на станке нового шлифовального круга. При соответствии эталона 8-й степени точности считалось, что требуемый профиль зубьев шлифуемых колес обеспечен технологически. В целом это подтверждалось обкаткой колес на стадии приемосдаточных испытаний редукторов.

В связи с тем, что на координатно-измерительной машине измерение конкретных отклонений зубьев осуществляется автоматически по заранее заданной программе, а базирование детали на рабочем столе не требует сложной оснастки и существенно упрощается по сравнению с традиционными методами, показатели табл. 1 могут быть определены с высокой точностью и в полном объеме. В результате представляется возможным изготовление зубчатых колес заданного технического уровня строго в соответствии с действующими стандартами.

Установленный регламент показателей, контролируемых в системе ISO, включает: по нормам кинематической точности – накопленную погрешность шага F_{pr} и радиальное биение зубчатого венца F_{rr} ; по нормам плавности работы – отклонение шага f_{ptr} , а также комплексную погрешность профиля зубьев f_{HA} , FA , ffa по нормам контакта – также комплексную погрешность направления f_{HB} , FB , ffb .

Кроме того, измеряются величины, характеризующие сопряжение зубьев в передаче, а именно (на выбор): размер по длине общей нормали (при этом указывается количество охватываемых зубьев); толщина зубьев по хорде; раз-

мер между зубьями по роликам.

Сопоставление приведенного перечня с табл. 1 показывает, что в системе ISO по сравнению с ГОСТом точность зубчатого колеса оценивается увеличенным количеством параметров: по нормам кинематической точности двумя показателями: F_{pr} и F_{rr} против одного в ГОСТ (F_{pr} либо F_{rr}); по нормам плавности отклонения профиля представлено тремя показателями, в том числе f_{HA} – погрешность угла профиля, ffA – погрешность формы профиля и, наконец, FA – полная погрешность профиля, которая соответствует по физическому смыслу f_{rr} погрешности формы зубьев по ГОСТ 1643-81.

Аналогичное положение и по нормам контакта зубьев. Здесь также в ISO три показателя: f_{HB} – погрешность угла линии контакта, ffB – погрешность формы линии контакта, FB – общая погрешность линии контакта, которая и по обозначению и по смыслу соответствует ГОСТ.

При измерениях по действующим ГОСТам задача упрощается – в приведенных выше комплексах контрольной оценке подлежит только FA (f_r) и FB ($F_{\beta r}$). Другие оценки по профилю (f_{HA} , ffA) и направлению (f_{HB} , ffB) можно опустить, как неустановленные действующим ГОСТ. Этот фактор важно учитывать при пользовании протоколами в условиях производства.

Из сопоставления показателей ISO с табл. 1 также следует, что кроме обозначения полной погрешности профиля f_{fr} по ГОСТу вместо FA в ISO все остальные буквенные обозначения контролируемых величин совпадают. Это упрощает процесс анализа результатов измерений.

Единственной условностью использования данных по ISO в действующих стандартах ГОСТ можно считать подмену предельного отклонения шага зацепления f_{pb} – соответственно предельным отклонением просто шага зубьев f_{pt} в нормах плавности колес 8-ой и точнее степеней точности. Основанием такого допущения можно считать близкое (в пределах 5% значений) совпадение абсолютных значений данных отклонений.

Литература: 1. Технологія машинобудування: підручник / О.В. Якимов, В.М. Царюк, О.О. Якимов, Г.О. Оборський, В.П. Ларшин, О.В. Самойленко. – Одеса: Астропринт, 2001. – 608 с.

УДК 621.9

НЕЙРОННЫЕ СЕТИ КАК НОВЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Приходько О.Ю., канд. техн. наук, **Слипченко С.Е.** (г. Харьков, Украина)

In article feature of use one of management methods is considered by the equipment of neural networks. With use of a method of neural networks attempt of forecasting of behavior a ball of screw pair taking into account variability of its basic characteristics is made.

Современные станки и инструмент позволяют вести обработку на высоких скоростях и с большими подачами, во многих областях преобладает единичное и мелкосерийное производство, детали имеют формообразующие поверхности

сложной формы. В этих условиях существующие способы управления станками становятся малоэффективными. Одним из новых методов управления оборудованием, приобретающего все большее распространение на западе, является управление на основе нейронных сетей.

Теория современного управления (адаптивного и оптимального), и теория классического управления в значительной степени базировались на идее линеаризации систем. Для их практического применения требовалась разработка математических моделей. В действительности же если и удастся построить модель точно отражающую связь между выходом и входом системы, то она часто оказывается непригодной для целей управления. Практически приемлемыми могут быть только модели с низкой чувствительностью по параметрам, что сложно обеспечить для нелинейных систем.

Наиболее широкое применение получили статистические модели управления (модель авторегрессии) и адаптивное управление. Достоинство статистических моделей в их простоте и возможности проверки на адекватность путем исследования частотных характеристик с использованием спектрального анализа. При помощи такого метода можно исследовать поведение конструкции в определенном диапазоне частот путем анализа частотных характеристик методами классической теории управления. К недостаткам относятся: недостаточная точность и отсутствие у используемых переменных и параметров физического смысла.

Адаптивное управление основывается на математических моделях, описывающих физические процессы и явления. Воздействие на управляемый процесс ведется согласно целевой функции - закона управления, направленного на достижение и поддержание наиболее эффективного значения какого-либо параметра (себестоимость, износ инструмента и т.д.).

К адаптивному управлению относятся управление с самонастройкой, обобщенно-погнозирующее управление и управление на основе нечеткой логики. Все эти способы управления нашли применение в различных технических системах, но не получили широкого распространения по ряду причин. Основными недостатками данного типа управления является его малая гибкость: при изменении в объекте управления или во внешних условиях требуется перестраивать модель и определять для нее новый закон управления. Таким образом, требуется постоянно «вручную» определять адекватность математической модели.

Альтернативой существующим системам управления являются искусственные нейронные сети. Нейронные сети являются математическим аналогом биологических нейронов мозга. Нейронные сети основаны на объединенной теории Колмогорова-Арнольда-Хехт-Нильсена из которой, в частности, следует что для любого алгоритма существует нейронная сеть, которая его реализует. Откуда можно сделать вывод о том, что нейронные сети являются универсальными вычислительными средствами для аппроксимирования функций.

Преимуществами нейронных сетей перед традиционными системами управления является:

1. Нейронные сети могут обучаться любым функциям, важен только объем

предоставленных данных и выбор правильной нейронной модели. Таким образом нейронные сети позволяют избежать использования сложного математического аппарата;

2. Использование нелинейных функций активации в нейронных сетях позволяет реализовать задачи с существенными нелинейностями;
3. Нейронные сети являются самообучаемыми системами. Это означает возможность осуществлять управление в условиях существенных нелинейностей;
4. Высокая степень параллельности нейронных сетей обеспечивает высокую производительность вычислений;
5. Архитектура параллельной обработки позволяет нейронным сетям функционировать даже при повреждении отдельных элементов сети.

Из этого следует, что нейронные сети имеют большие перспективы в области управления сложным техническим оборудованием.

ВЫВОДЫ.

Нейросетевое управление свободно от ограничений на линейность системы, эффективно в условиях шумов и после окончания обучения обеспечивает управление в реальном масштабе времени. Нейросетевые системы управления более гибко настраиваются на реальные условия, образуя модели полностью адекватные поставленной задаче, не содержащие ограничений, связанных с построением формальных систем. Кроме того, нейросетевые системы управления не только реализуют стандартные адаптивные методы управления, но и предлагают свои алгоритмические подходы к ряду задач, решение которых вызывает затруднение вследствие неформализованности. Так, появляется возможность обработки в рамках одной модели данных одной природы - для нейронных сетей важна лишь их коррелированность.

Таким образом, будущее интеллектуального управления лежит в сочетании традиционного управления с потенциальными возможностями и перспективами использования систем, основанных на использовании искусственных нейронных систем.

УДК 621.923

УСЛОВИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ФЕРРОКЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Усов А.В., докт. техн. наук, **Богданова Е.Н.** (г. Одесса, Украина)

Technological means of lowering the flaws percentage while producing ferroceraimical details, used in electromechanical machinery is researched. Besides this, the model that allows the technological parameters optimization of half-finished products sintering was made.

Введение

Изделия из феррокерамики в силу широкого диапазона магнитных свойств в большом объеме используются в электроэнергетике - в генераторах, электроприводах, трансформаторах, и др. Благодаря уникальным сочетаниям электромагнитных свойств ферриты находят применение и в других областях техники.

Объем их производства в мировом масштабе достиг десятков миллионов тонн в год и продолжает непрерывно увеличиваться. Поэтому весьма актуальным является совершенствование технологических процессов переработки отходов (в том числе и брака) ферритового производства, поскольку доля этих отходов достигает 30%. Переработка отходов в годные полуфабрикаты и изделия не только позволяет экономить сырьевые материалы, энергетические и трудовые ресурсы, но и способствует уменьшению нагрузки на окружающую среду [1].

Технологические потери связаны с потерей сырья, полуфабрикатов и годных изделий в результате несовершенства технологического процесса и технологического оборудования (негерметичность, отсутствие системы улавливания, частые поломки и т.д.). Брак связан с отклонениями параметров полуфабрикатов и годных изделий выше допустимых значений. В целом брак подразделяется на два вида: устранимый и неустранимый. Переработка устранимого брака в годные полуфабрикаты и изделия обычно требует дополнительных операций, связанных с глубокими физико-химическими превращениями. Для переработки неустранимого брака необходимы дополнительные операции, связанные с измельчением и помолом, термообработкой, активированием путем химического модифицирования поверхности частиц и т.д. Технологические отходы связаны с образованием побочных продуктов на различных технологических операциях (отходы формовочных масс, отходы шлифования и других видов механической обработки, отходы изделий после различных видов испытаний и т.д.), их также можно подразделить на два вида: утилизируемые в годные полуфабрикаты; утилизируемые в экологически безопасные формы.

Цель работы

Основное внимание исследователей уделялось обеспечению качественных характеристик ферритов на финишных методах [2,3].

В процессе обработки шлифованием феррокерамических изделий характерным видом брака являются дефекты типа трещин, существенно снижающие их эксплуатационные свойства, а зачастую они приводят к последующей переплавке.

Выделяют следующие типы трещин при шлифовании феррокерамических материалов, предрасположенных к такому виду дефектов:

- сетка поверхностных трещин, залегающих на относительно небольшую глубину /до 0,5 мм - 1,5 мм/, сколы;
- магистральные глубинные трещины /1-10 мм/,
- подповерхностные замкнутые трещины;

Характер и интенсивность трещинообразования во многом определяется теплофизическими свойствами обрабатываемых материалов, их структурой, наследственностью предыдущих технологических операций, режимами шлифования, а также характеристиками применяемых кругов. При эксплуатации деталей, поверхностный слой которых содержит шлифовочные трещины, разрушение изделий происходит по местам их скопления.

Шлифовочные дефекты на обработанных поверхностях деталей резко снижают /иногда до 30 раз/ их эксплуатационные показатели и являются недопустимыми.

Поэтому задача определения технологических условий бездефектного

шлифования и управления качеством поверхностного слоя изделий из материалов склонных к трещино- и сколообразованию является весьма актуальной. Это предопределяет необходимость изучения механизма формирования шлифовочных дефектов.

Брак при шлифовании обусловлен образованием сколов, занижением геометрических размеров, а также появлением скрытого брака после спекания (вскрытие трещин). Брак шлифования неисправим и отправляется на переработку вместе с браком спекания.

Особый интерес вызывают современные исследования качественных характеристик рабочих поверхностей феррокерамических изделий при обработке шлифованием.

Качество поверхностного слоя этих изделий формируется под действием термомеханических явлений, сопровождающих финишные операции. Поэтому в качестве основного показателя физико-механического состояния обрабатываемых поверхностей используется теплонапряженность алмазно-абразивной обработки. На основании разработанных в [2] моделей температурных полей изучаются закономерности образования дефектов и технологические возможности их устранения в зависимости от теплофизических свойств обрабатываемых материалов, режимов шлифования, конструкции и характеристик применяемых инструментов.

Реализация поставленной цели

Однако, имеющиеся в настоящее время модели тепловых процессов алмазно-абразивной обработки получены в предположении однородности шлифуемых материалов и не учитывают наличие дефектов технологической наследственности изделий. Изучению причин образования шлифовочных дефектов-трещин посвящены работы [2,3] в которых напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя детали рассматривается, в основном, с качественной стороны или оценивается в каждом отдельном случае экспериментальными методами. Так, предрасположенность магнитных сплавов к трещинообразованию при обработке их шлифованием многие исследователи связывают с особенностями их магнитной и кристаллической структуры, предназначенной для получения высоких магнитных свойств. Отсутствие каких-либо количественных связей трещиностойкости магнитов с другими свойствами не позволяет однозначно пользоваться имеющимися рекомендациями по бездефектной обработке шлифованием. Феноменологический подход в изучении причин трещинообразования феррокерамических материалов склонных к этому виду дефектов не позволяет вскрыть механизм зарождения и развития шлифовочных трещин.

Интенсивность появления трещин во многом определяется наличием различного рода неоднородностей, возникающих в поверхностном слое по ходу технологии изготовления детали. Особенно опасными с точки зрения зарождения трещин, являются такие наследственные дефекты, как флокены, остроконечные полости, инородные включения. Поэтому построение теории трещинообразования при шлифовании с использованием критериев механики разрушения, возможно лишь на основе углубленного изучения механизма зарождения

трещин в вершинах концентраторов, которыми являются металлургические, структурные и технологические дефекты.

Для управления качеством детали при шлифовании необходимо изучить закономерности формирования термомеханического состояния поверхностного слоя с учётом его неоднородности. Высокопроизводительное бездефектное шлифование материалов, чувствительных к трещинообразованию, необходимо осуществлять с учетом наследственных дефектов на предельных режимах, при сохранении равновесного состояния, ещё не вызывающих образование трещин. До настоящего времени не имеется данных для разработки соответствующих рекомендаций.

При постановке задачи о повышении качества шлифования феррокерамических деталей возникает проблема оценки влияния неоднородностей, выбора режимов и характеристик инструмента, смазочно-охлаждающей среды, использование которых исключает трещинообразование на обрабатываемых поверхностях. Широкая номенклатура ферритов, подверженных трещинообразованию, многообразие их свойств, размеры, ориентация, размещение и распределение наследственных дефектов способствовали тому, что имеющиеся в настоящее время рекомендации по устранению шлифовочных трещин при обработке поверхностей изделий из них не могут быть общепринятыми. В связи с этим необходимо разработать предпосылки для оптимизации термомеханического состояния поверхностного слоя с учетом его дефектности, исключая возникновение шлифовочных дефектов типа трещин.

Решение указанных задач позволяет не только изучать прямую технологическую задачу финишной обработки - обеспечение бездефектного шлифования материалов, предрасположенных к трещинообразованию, но и перейти к технологии изготовления материалов "малочувствительных" к указанным дефектам за счет технологической наследственности, формирующей структуру физико-механических свойств поверхностного слоя, начиная от способов получения заготовок и заканчивая чистовым алмазно-абразивным шлифованием.

При выборе и обосновании математической модели учитывалось, что процесс шлифования деталей сопровождается как тепловыми, так и механическими явлениями. Однако преобладающее воздействие на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя оказывают температурные поля. Учитывая то, что основная масса поверхностного слоя металла при шлифовании находится в упругом состоянии, можно воспользоваться моделью термоупругого тела, отражающей взаимосвязь механических и тепловых явлений при конечных значениях тепловых потоков. Так как для исследований термомеханического состояния шлифуемых поверхностей важной является информация о распространении температур и напряжений по глубине и в направлении движения инструмента, то рассматривается плоская задача.

Анализ масштабных схем взаимодействия круга с обрабатываемой поверхностью показывает, что кривизна круга и детали в пределах зоны контакта несущественно влияет на геометрическую схему взаимодействия круга с деталью. Влияние неоднородностей в виде фазовых превращений неустойчивых структур, межзеренных плёнок, границ кон тура наследственных зёрен, кар-

бидной строчечности, неметаллических включений, раковин, флоконов и др. дефектов, возникающих в поверхностном слое по ходу технологического процесса, учитывается в модели наличием в поверхностном слое включений и дефектов в виде условных трещин и включений (рис.1).

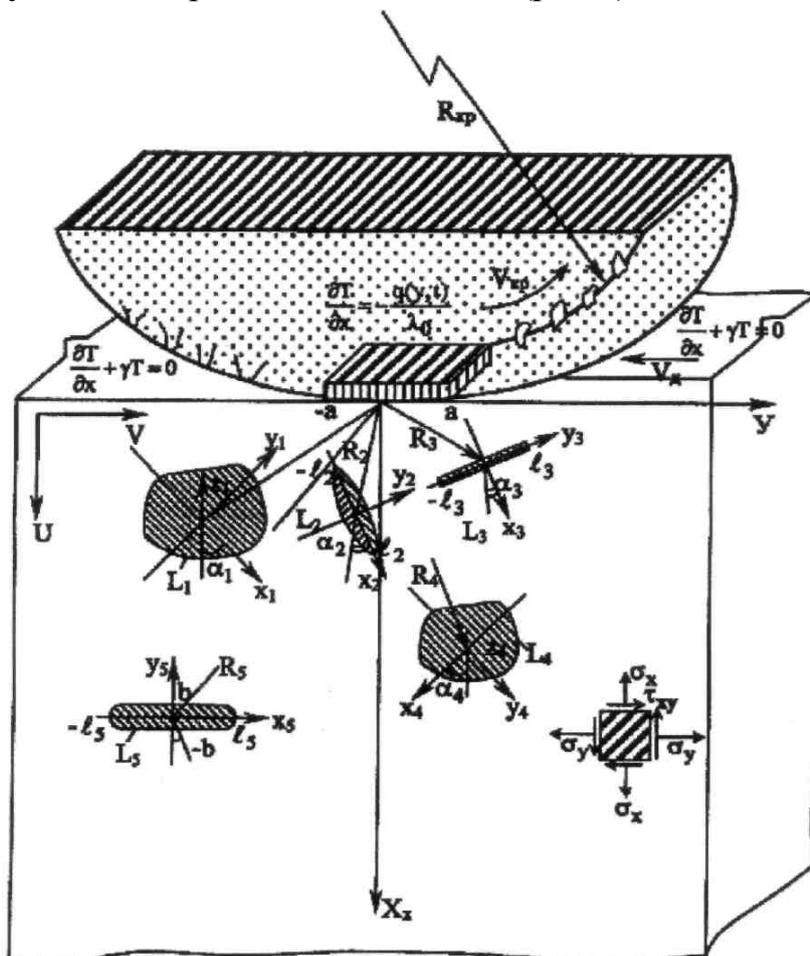


Рис. 1. Расчетная схема для моделирования термомеханических явлений при шлифовании

Система уравнений, определяющих тепловое и напряженно-деформированное состояние при шлифовании поверхности феррокерамических деталей, верхний слой которых имеет неоднородности типа включений и трещин, содержит:

Уравнение нестационарной теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad 0 \leq x \leq \infty; \quad -\infty < y < \infty. \quad (1)$$

Уравнение упругости Ламе в перемещениях:

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \cdot \frac{1}{1-2\mu} + \Delta \bar{v} = B^T \frac{\partial T}{\partial x}; \quad \bar{v}(x, y) = \frac{v}{2G}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \cdot \frac{1}{1-2\mu} + \Delta \bar{v} = B^T \frac{\partial T}{\partial y}; \quad B^T = \frac{4G(1+\mu)}{1-2\mu} a_k; \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}. \quad (3)$$

где: $T(x, y, \tau)$ - температура в точке с координатами (x, y) и в любой момент времени τ ; a - температуропроводность материала; a_1 - температурный коэф-

коэффициент линейного расширения; μ , G - постоянные Ламе; u , v - компоненты вектора перемещений точки (x, y) ; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ - оператор Лапласа.

Начальные условия для данной задачи можно взять в виде: $T(x, y, 0) = 0$ (4)

Граничные условия для температурных и деформационных полей, учитывающие теплообмен с поверхности вне зоны контакта круга с деталью и интенсивного тепловыделения в зоне обработки имеют вид:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{q(y, \tau)}{\lambda}, \quad |y| < a^*, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \gamma T = 0, \quad |y| > a^* \quad (5)$$

$$\sigma_x(x, y, \tau)|_{x=0} = \tau_{xy}(x, y, \tau)|_{x=0} = 0, \quad (6)$$

где: $q(y, \tau)$ - интенсивность теплового потока, формирующегося в результате взаимодействия круга с деталью; λ - коэффициент теплопроводности шлифуемого материала; $2a^*$ - длина зоны контакта круга с обрабатываемой поверхностью; γ - коэффициент теплообмена с окружающей средой; σ_x , τ_{xy} - нормальные и касательные напряжения.

Условия сопряжения слоев:

для температурных полей	для деформационных полей
$T(a_k - 0, y, \tau) = T(a_k + 0, y, \tau)$	$u_1(a_k - 0, y) = u_1(a_k + 0, y)$
$\lambda_{k-q} \frac{\partial T}{\partial x}(a_k - 0, y, \tau) = \lambda_k \frac{\partial T}{\partial x}(a_k + 0, y, \tau)$	$\sigma_x(a_k - 0, y) = \sigma_x(a_k + 0, y)$
	$\tau_{xy}(a_k - 0, y) = \tau_{xy}(a_k + 0, y)$

где λ_k - теплопроводность k -го слоя; a_k - толщина k -го слоя; u_1 , v_1 - компоненты перемещений в k -ом слое.

Для поверхностных слоев, имеющих структурные и технологические неоднородности, условия разрывности решения в зависимости от типа дефекта будут:

на включениях	на трещиноподобных дефектах
$\langle \bar{v} \rangle = 0, \langle \sigma_x \rangle \neq 0$	$\langle \sigma_x \rangle = 0, \langle \bar{v} \rangle \neq 0$
$\langle \bar{v} \rangle = 0, \langle \tau_{xy} \rangle \neq 0$	$\langle \tau_{xy} \rangle = 0, \langle \bar{v} \rangle \neq 0$

где $\langle \bar{v} \rangle$, $\langle \bar{v} \rangle$, $\langle \sigma_x \rangle$, $\langle \tau_{xy} \rangle$ - скачки компоненты смещения и напряжения.

Предельно равновесное состояние деформируемого поверхностного слоя оценивалось классическими критериями прочности.

Из имеющихся критериев разрушения, учитывающих локальные физико-механические свойства неоднородных материалов, наиболее приемлемыми для данного случая являются критерии силового подхода, связанные с использова-

нием понятия коэффициента интенсивности напряжений /КИН/. Когда нагружение приводит к тому, что интенсивность напряжений K_1 становится равной предельному значению K_{lc} , то трещинообразный дефект превращается в магистральную трещину.

Моделирование влияния исходной кусочной однородности шлифуемых материалов /деталей с покрытиями/ на термомеханические процессы осуществляется методом разрывных решений, разработанного проф. Поповым Г.Я.[4] Под ними понимаются такие решения, которые удовлетворяют уравнениям теплопроводности Фурье и упругости Ламе всюду, кроме границ дефектов. При переходе через границу поля смещений и напряжений терпят разрывы I рода, т.е. появляются их скачки $\langle v \rangle$, $\langle \sigma_x \rangle$, $\langle \tau_{xy} \rangle$.

Решение тепловой задачи /1/, /4/, /5/, /7/ осуществляется с помощью интегральных преобразований Фурье по переменной y и Лапласа по τ к функции $T(x, y, \tau)$ в I ($k=0$) слое, которые описываются в интегральной форме в виде:

$$T_0(x, y, \tau) = \int_{-a}^a d\tau \int_0^\tau \chi(t - \tau, x, y - \eta) dt, \quad (9)$$

где $q(t, x, y - \eta) = \frac{1}{2\pi i} \int_r K_p^m(y - \eta, x) e^{pt} dp$, $\chi(y, \tau) = \sum_{m=0}^{\infty} \chi_m(y) 2e^{-\tau} L_m(2\tau)$, $L_m(2\tau)$ -

полиномы Лаггера, $K_p^m(y - \eta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-t\beta(y-\eta)}}{l_{m_1\beta p}}$, $l_{m_1\beta p}$ - выражение, учитывающее теплофизические свойства слоев ($k=0-m$), их толщину и граничные условия.

Напряженно-деформированное состояние слоистой полуплоскости также оценивается методом разрывных решений. Границы раздела $x = a_k$ ($k=0$) рассматриваются как дефекты, при переходе через которые терпят разрывы поля смещений и напряжений.

Построение разрывных решений уравнений Ламе с заданными скачками осуществляется с помощью функций Треффца:

$$\bar{v} = \psi_1 + (x - a) \cdot \psi'_0, \quad \bar{v} = \psi_2 + (x - a) \cdot \psi'_0; \quad \psi'_0 = \frac{\psi'_1 + \psi'_2}{3 - 4\eta}, \quad e = \psi'_1 + \psi'_2 + \psi'_0, \quad (10)$$

где $\Delta\psi_0(x, y) = 0$, $\Delta\psi_j(x, y) = b'_k T^{(j)}$, ($j=1,2$) $\frac{\partial}{\partial x}$ $\frac{\partial}{\partial y}$

Напряжения находят по формулам:

$$\sigma_x = (1 - \mu)\psi'_0 + \psi'_1 + (x - a_k)\psi'_0; \quad \sigma_y = -\mu\psi'_0 + \psi'_2 = (x - a)\psi''_0 \quad (11)$$

$$\tau_{xy} = \psi_1^2 = 2(x - a_k)\psi'_0 + \psi'_2 + \psi'_0.$$

Применение обобщенных преобразований Фурье по переменным x, y к уравнениям /2/, /3/, /6/, III с учетом /10/ позволяет получить рекуррентные соотношения, связывающие смещения и направления в k -м слое с напряжениями и смещениями, формирующимися в первом слое под действием нестационарных температурных полей.

Влияние неоднородностей в поверхностном слое феррокерамических

сплавов на интенсивность трещино- и сколообразования при шлифовании исследуется следующим образом. В условиях неравномерного нагрева в поверхностном слое возникают тепловые деформации, которые вызывают температурные напряжения. Под действием этих напряжений, концентрирующихся в местах расположения дефектов, и происходит образование шлифовочных трещин.

Так, исследование интенсивности напряжений в вершинах дефекта длиной $2l$, расположенного на глубине σ^* , когда на поверхности тела $|x=0, |y|\leq a^*$ задан тепловой поток q , позволило установить предельное значение этого потока q^* при котором указанный дефект начинает развиваться в магистральную трещину:

$$q^* = \frac{2\sqrt{3}\lambda(1-\nu)K_{4C}}{a_2 E l \sqrt{\pi d} \sigma^*}.$$

Взаимное влияние дефектов на интенсивность напряжений, сказывается при расположении их на расстоянии друг от друга не более $\sigma^* = \frac{1}{3}$. При этом наименьшая трещиностойкость материала достигается если дефекты ориентированы относительно друг друга под углом $\varphi = \frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{4}$. Геометрия и свойства включения могут создавать условия как для торможения, так и для развития шлифовочных трещин. Если тепловой поток направлен параллельно большей оси эллиптического включения и прямолинейной термоизолированной трещине, то при коэффициенте линейного температурного расширения a_1^B включения больше, чем основного материала $a_1^M / a_1^B > a_1^M /$, увеличение жесткости включения приводит к возрастанию K_1 , для различных отношений коэффициентов теплопроводности, составляющих материала.

Это приводит к снижению трещиностойкости поверхностного слоя. Для дефектов типа трещин, находящихся в слое с меньшим коэффициентом a_1 , ориентация дефекта сильно влияет на величину КИН.

В действительности, поверхностный слой шлифуемых ферритов содержит неоднородности и дефектность наследственного происхождения, обладающие той или иной степенью случайности. Особенно существенна стохастичность микрон неоднородностей в феррокерамических сплавах. Поэтому при исследовании причин появления шлифовочных трещин, кроме детерминированного, необходим вероятностно-статистический подход.

Стохастическая модель трещинообразования при шлифовании металлов гетерогенной структуры построена на базе комплексного подхода, опирающегося на результаты детерминированной теории развития отдельных дефектов и методы теории вероятностей. Поверхностный слой рассматривается как среда, ослабленная случайными невзаимодействующими между собой дефектами - трещинами, включениями, определяющие параметры которых являются случайными величинами с известными законами их вероятностного распределения. Исследуется вероятность разрушения поверхностного слоя в зависимости

от различных типов вероятностного распределения размеров /длины, глубины/ дефектов, их ориентации. С этих же позиций рассматриваются вероятностные характеристики предельного теплового потока. Установлено, что увеличение однородности материала приводит к возрастанию значения теплового потока, соответствующего фиксированной вероятности разрушения.

Для повышения магнитных свойств, сохранения качественных характеристик рабочих поверхностей и геометрии броневых сердечников и сегментов, разработаны новые станки и инструмент (рис.2), с использованием ряда приспособлений и конструкций, позволяющих производить шлифование партиями изделий с одной установки.

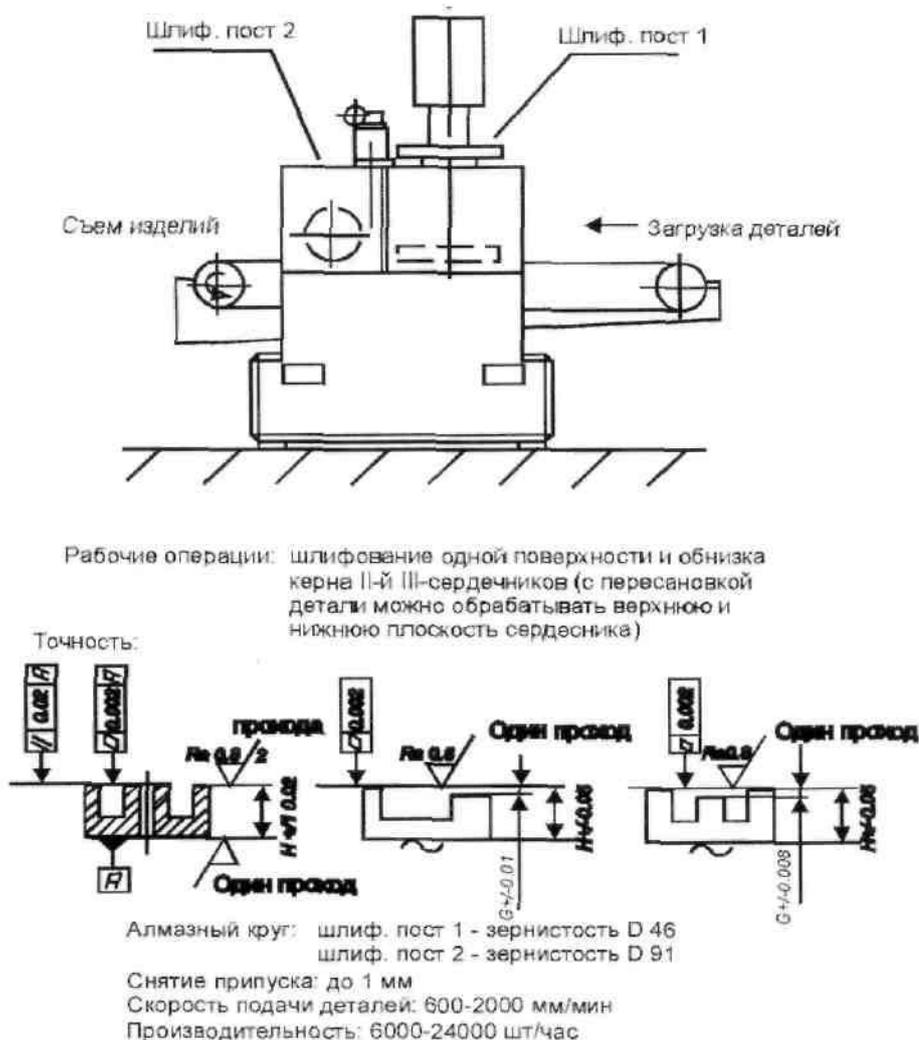


Рис. 2. Высокопроизводительное плоское шлифование Ш и П - броневых сердечников.

Для того, чтобы достичь оптимальных параметров поверхностного слоя феррокерамических изделий нужно увеличить окружную скорость V алмазного круга, до 100 м/с.

Этой скоростью можно достичь, с другой стороны, при помощи двух новых параметров: d - диаметр круга (например, при плоском шлифовании с кругом 500 мм и приводом трехфазного тока для шпинделя 3600 об/мин при 60 Гц); n - число оборотов шпинделя (например, при профильном шлифовании с кругом

300 мм и приводом постоянного тока для шпинделя до 4500 об/мин).

При этом режиме подачи могут достигать 50 мм/с и более.

Параметры h_m и l определяют, естественно, качество отшлифованной поверхности. Они отчасти зависят от спецификации круга, т.е. количества алмазных зерен на оборот круга.

Влияние конструктивных параметров инструмента на термомеханическое состояние поверхностного слоя определялось с помощью модельной задачи (1), (4), и граничных условий в виде:

$$q(y, \tau) = \frac{c\sqrt{t}}{\lambda} [H(y) - H(y - 2a^*)] \sum_{k=0}^n \sigma(y = kl - v_{кр}\tau), \quad (12)$$

где: $H(y)$ - функция Хевисайда; $\sigma(y)$ - дельта-функция Дирака; n - количества зерен, проходящих в зоне контакта за время $\tau = \frac{\sqrt{\pi t_{шл}}}{v_{кр}}$; λ - теплопроводность

материалов изделия; $c\sqrt{\tau}$ - тепловой поток от единичного зерна; v_g , $v_{кр}$, $t_{шл}$ режимы шлифования, $2a^*$ - длина дуги контакта круга с деталью; l^* - расстояние между режущими зернами. Получены теоретически и подтверждены экспериментально максимальные значения мгновенной температуры T_m , от единичных зерен и постоянной составляющей - T_k , которые использованы в дальнейшем в качестве критериальных при прогнозировании условий образования дефектов типа трещин.

Выводы: 1. Для бездефектной обработки феррокерамических сплавов, имеющих трещиноподобные дефекты и включения, при выборе режимов обработки и характеристик инструмента следует руководствоваться предельными значениями теплового потока, формирующегося при шлифовании, чтобы наследственные дефекты не вышли из равновесного состояния. 2. Выбор шлифовального круга в качестве инструмента представляет собой очень серьезную задачу для технологов. Вместе с выбором охлаждающего средства и установочных величин он определяет успех или неуспех выполнения поставленной задачи.

Литература: 1. Рабкин Л.И., Слискин С.А., и др. Ферриты. Строение, свойства, технология производства. - Л.: Энергия, 1968. - 384с. 2. Якимов А.В., Усов А.В., и др. Теплофизика механической обработки. - К.: Одесса: Лыбидь, 1991. - 240с. 3. Усов А.В., Дубров А.Н., и др. Моделирование систем с распределенными параметрами. - Одесса: Астропринт, 2002. - 664 с. 4. Попов Г.Я. Концентрация упругих напряжений возле штампов, разрезов, тонких включений и подкреплений. - М. Наука, 1982. - 344 с.

2. ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 623.454.86

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ПРОТИДІЇ РОЗПОВСЮДЖЕННЮ ХМАРИ ЗАБРУДНЕНОГО ПОВІТРЯ

Сатановський Є.А., канд. техн. наук, **Каракуркчі Д.А.**, **Мальований С.В.**
(м. Харків, Україна)

The review of existent methods of raising of barrier is conducted to distribution of cloud of the infected air. The method of rendering of cloud of the infected air harmless and his practical application is offered by facilities of the special treatment of troops of radiation, chemical, biological defense and fire technique.

Хмара забрудненого повітря (ХЗП), що утворюється внаслідок зруйнувань хімічно небезпечних об'єктів або бойових дій (терористичних актів) із застосуванням хімічної та біологічної зброї, суттєво впливає на боєздатність силових структур і безпеку цивільного населення [1–4].

У випадку аварії на хімічних підприємствах, що використовують сильнодіючі отруйні речовини (СДОР), або аварій при транспортуванні СДОР, в навколишнє середовище виливається або викидається значна кількість таких речовин. ХЗП поширюється в атмосфері на великі відстані, створюючи зону зараження з небезпечною для людей концентрацією отруйних речовин у приземному шарі атмосфери.

Прикладом такої надзвичайної події може бути аварія на залізниці, коли у Буському районі Львівської області на перегоні Червоне–Ожидів зійшли з рейок і перевернулися 15 цистерн із жовтим фосфором. Через витікання фосфору з однієї цистерни відбулося самозаймання 6 цистерн.

Внаслідок низького технічного оснащення підрозділів МНС, не здійснювався такий захід щодо захисту населення прилеглих населених пунктів і природних екосистем, як постановка захисних газових, аерозольних і водяних завіс у напрямку поширення хмари продуктів згоряння фосфору (оксидів) між джерелом загоряння й селитебною зоною (ефективніше – по периметру місця аварії). Внаслідок процесу горіння при надлишку кисню без доступу води утворилася хмара зараженого повітря у вигляді диму оксиду фосфору (V). Димова хмара оксидів фосфору розповсюджувалася в напрямку вітру й, внаслідок розсіювання й седиментації (осадження), утворила на поверхні ґрунту слід неправильної форми на відстані, орієнтовно, близько 10 км. Небезпеку для навколишнього середовища варто оцінювати окремо для атмосфери, ґрунту, водних артерій, флори, фауни, комах і людину.

Таким чином, актуальною є задача створення комплексу організаційно-технічних заходів, щодо експресної та повної нейтралізації хмари забрудненого повітря.

Метою роботи є аналітичний огляд аварійних систем активного захисту від хмари забрудненого повітря у приземному шарі атмосфери та обґрунтуван-

ня складу газо-аерозольної завіси для запобігання розповсюдженню хмари забрудненого повітря.

У МНС Російській Федерації авторами [5–7] пропонується принципово нова, що не має аналогів у світовій практиці, аварійна система активного захисту населення від хімічно небезпечних речовин (рис. 1).

Система дозволяє запобігти поразці людей отруйними речовинами без евакуації й припинення економічної діяльності населення в регіоні у випадку викиду отруйних речовин поблизу селитебної зони.

Такий спосіб активного колективного захисту населення від отруйних речовин, полягає в зменшенні концентрації отруйних речовин у приземному шарі атмосфери в селитебній зоні до рівнів, безпечних для життя людей, шляхом розсіювання отруйних речовин в атмосфері за допомогою захисної приземної плоскої спрямованої вертикально вгору струминної газоповітряної завіси, розташованої між джерелом зараження отруйними речовинами й селитебною зоною. Така ГПЗ має в плані форму дуги, із центром дуги в джерелі зараження [5]. Захисна ГПЗ викликає за рахунок сил низького тертя підйом приземної частини ХЗП, що рухається по вітру від джерела небезпеки, на відстань, що дорівнює висоті завіси. Більш високі частини хмари піднімаються на ще більшу висоту. Після підйому завісою ХЗП не опускається до поверхні ґрунту, а розсіюється в атмосфері. При цьому концентрація отруйних речовин у приземному шарі по ходу руху хмари значно нижче, ніж без підйому ГПЗ. Недоліком зазначеного способу є відсутність установки для формування захисної ГПЗ необхідних геометричних розмірів.

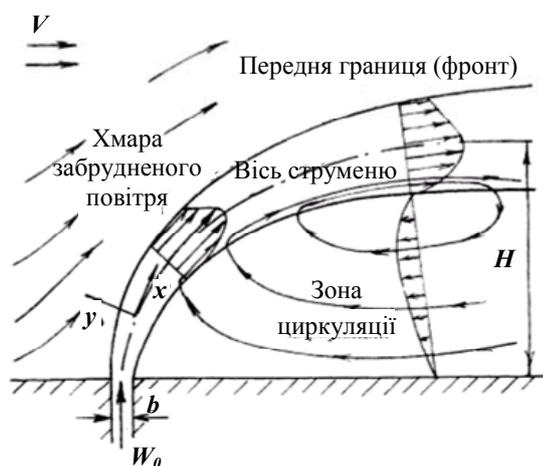


Рис. 1. Схема протікання при вдуванні плоского струменю у поперечний потік.

Найбільш близьким по технічній сутності та результативності, щодо даного винаходу є спосіб формування ГПЗ шляхом утворення плоского приземного, спрямованої вгору газоповітряного струменю за допомогою установки, що містить повітродувну машину та з'єднаний з нею наземний повіторозподільчий короб з розташованим у верхній частині повітровипускаючий щілинним насадком [6]. Повітродувна машина нагнітає атмосферне повітря у повіторозподільчий короб. Це повітря, при витіканні через спрямований вгору повітровипускаючий щілинним наса-

док, утворить захисну газоповітряну завісу.

Існує видозміна попереднього методу, і полягає вона в тому, що розсіювання виконують за рахунок відбору частини прилягаючого до поверхні, що підстилає, потоку повітря, що набігає, та який утримує аварійні хімічно небезпечні речовини, й наступної зміни напрямку його руху, прискорення й викиду вертикально нагору у вигляді плоского поперечного струменя.

Недоліком зазначеного способу є низька ефективність захисної завіси внаслідок обмеженого діапазону експлуатаційних характеристик установки, що не дозволяє створити ГПЗ необхідної довжини й висоти.

Розглянутий типовий приклад передбачає формування в потоці повітря зі швидкістю 3 м/с поперечної плоскої спрямованої вертикально струминної ГВЗЗ висотою 50 м і довжиною 100 м. Експериментальні дані по висоті підйому плоского повітряного струменя в потоці рухомого повітря показують, що для формування такої захисної завіси необхідно вдмухувати повітря вертикально вгору, наприклад, зі швидкістю $W=15$ м/с через щілину довжиною 10 м і шириною 1,67 м. Для формування одного погонного метра такої ГПЗ потрібно забезпечити об'ємну витрату повітря 25 м³/с (90000 м³/год). При цьому площа поперечного переріза повітродозподільного коробу в початковій його частині повинна бути у 2 рази більше площі перетину повітровипускаючої щілини, тобто $3,34$ м². Для формування захисної завіси такої ж висоти 50 м, але довжиною 100 м установка повинна забезпечити відповідно в 10 разів більші експлуатаційні характеристики: об'ємна витрата повітря 250 м³/с (900 000 м³/год) при площі поперечного переріза початкової частини повітродозподільного короба $33,4$ м². При цих умовах габарити установки – площа поперечного переріза початкової частини квадратного повітродозподільного коробу становить $33,4$ м² при стороні квадрата $5,78$ м. Такі експлуатаційні характеристики установки як продуктивність повітродувної машини й габарити перебувають на грані практично реалізованих. Подальше збільшення довжини захисної завіси вимагає пропорційного збільшення цих характеристик, що виходить за межі сучасних можливостей.

Основними недоліками розглянутих методів є низька ефективність захисної завіси внаслідок обмеженого діапазону експлуатаційних характеристик агрегату, що не дозволяє створити ГПЗ необхідної довжини та висоти. Окрім цього, слід зазначити, що молекули ТР здатні переноситись потоками повітря на значні відстані у газоподібному та аерозольному (сорбція водним паром) стані. З урахуванням зазначеного явища, високо ймовірним буде факт потрапляння ТР через певний час у приземний шар повітря внаслідок седиментації або у вигляді опадів. Такий розвиток процесу розсіювання ХЗП пояснюється тим, що в процесі постановки газоповітряної завіси молекули ТР не піддаються хімічним перетворенням.

Для вирішення задачі створення захисної газоповітряної (газоаерозольної завіси) необхідно визначити три основних показники розповсюдження ХЗП:

- швидкість просування ХЗП;
- розподіл концентрації токсичного компонента у хмарі по висоті та у площині підстильної поверхні;
- фізико-хімічні та колоїдні властивості забрудненого об'єму повітря, що рухається.

Швидкість просування ХЗП відома з експериментальних даних, що відображено у численних методиках виявлення і оцінки хімічної обстановки воєн-

ного та цивільного призначення.

Відома державна Методика прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті призначена для прогнозування масштабів забруднення при аваріях з небезпечними хімічними речовинами (НХР). Методика застосовується тільки для НХР, які зберігаються у газоподібному або рідкому стані і які в момент викиду, виливу переходять у газоподібний стан і створюють первинну або/і вторинну хмару НХР. Методика передбачає проведення розрахунків для планування заходів щодо захисту населення тільки на висотах до 10 м над поверхнею землі (приземному шарі повітря).

На жаль у наведених експериментальних таблицях відсутні дані щодо динаміки зміни висоти підйому ХЗП і це є практично корисною науковою проблемою, що потребує окремих досліджень.

У відкритих джерелах було знайдено кілька праць, що стосуються висоти підйому ХЗП, тобто визначають висоту захисної завіси. Так, отримані в роботі [7] картини еволюції полів концентрації викиду сірчистого газу, діоксиду сірки й вуглекислого газу при різних початкових температурах газу $T_G=300^\circ\text{K}$, 500°K , 700°K , 900°K й температури атмосфери $T_a=300^\circ\text{K}$ свідчать, що залежно від умов зберігання й ступеня вертикальної стійкості повітря ХЗП не зберігає свою уражаючу дію на висоті більше 10 - 15 м. Таким чином, достатньою можна вважати висоту захисної завіси не менш ніж 15 м.

Одним зі шляхів вирішення задачі нейтралізації ХЗП може бути модернізація розглянутої вище ГПЗ. На відміну від ГПЗ, яка складається з струминного потоку гарячого повітря та має на меті тільки підйом та розсіювання молекул ТР, представляється більш ефективною газоаерозольна завіса (ГАЕЗ), яка буде складатися з речовини-дегазатору у газоподібному стані або рідких чи твердих частинок дисперсної фази (хімічної сполуки чи комплексу хімічних сполук, що реагують з молекулами ТР з утворенням нетоксичних або нелетючих продуктів) та дисперсійного середовища – гарячого повітря. Тобто, запропонована ГАЕЗ крім підйому та розсіювання ХЗП виконує функцію знешкодження ТР. Можливе й спільне (комплексне) послідовне застосування газоаерозольної та газоповітряної завіси, що надасть можливість підвищити ефективність існуючого способу зупинення та розсіювання ХЗП.

Для вирішення задачі створення захисних аерозольних завіс доцільно дослідити такі технічні характеристики, як склад дисперсної фази та дисперсійного середовища завіси й способи (технічні засоби) її отримання. Очевидно, що така завіса повинна характеризуватися достатньою стійкістю у часі в залежності від метеорологічних умов, мати необхідну густину (концентрацію речовини-дегазатора) та ефективно знешкоджувати ТР.

До складу пропонованої газоаерозольної суміші повинні входити речовини-дегазатори окислювальної (відновлювальної) дії. сполуки, які мають здатність до знешкодження та седиментації конкретного токсиканту. Універсальними активними дегазуючими агентами можуть бути рецептури з широким спектром не тільки антихімічної, але й антимікробної і дезінфікуючої дії –

ПФК-1 (на основі $\text{KF}\cdot\text{H}_2\text{O}_2$), ПФК-2 (на основі $\text{KF}\cdot\text{H}_2\text{O}_2 + \text{KF}\cdot 2\text{H}_2\text{O}_2$) і ПФК-3 ($\text{KF}\cdot 2\text{H}_2\text{O}_2$).

Постановка захисної завіси має на меті не тільки розсіювання та знешкодження агрегатів токсичних сполук, але й руйнування ХЗП, зменшення величини її розповсюдження шляхом спонукання та інтенсифікації седиментації. На швидкість руйнування таких систем з газовим дисперсійним середовищем, крім частоти зіткнення частинок, впливають ще й наступні чинники:

- коагуляції аерозолів сприяє полідисперсність і анізодіаметрична форма частинок;
- руйнування аерозолів прискорюється за наявності в них протилежно заряджених частинок. Навпаки, якщо частинки аерозолу володіють однаковими по знаку і достатньо великим по величині зарядом, то спостерігається розсіювання частинок;
- конвекційні потоки, механічне перемішування, ультразвукові коливання, оскільки всі ці дії збільшують вірогідність зіткнення частинок дисперсної фази та дисперсійного середовища.

Такі дрібнодисперсні водяні завіси створюються за допомогою систем водопостачання, пожежних машин або мотопомп, що забезпечують тиск струменю води не менш 0,6 МПа. При менших тисках, як правило, необхідна дисперсність крапель води, що здатні поглинати (зв'язувати) парогазову фазу СДОР, не досягається. Для створення дрібнодисперсних водяних завіс рекомендується в комплекті пожежних машин (мотопомп) мати спеціально обладнані брандспойти.

У випадку застосування ТДА (АГП), до складу яких входять цистерна, газотермічний генератор та розпилювач, для отримання аерозолів методом конденсації не потрібне встановлення додаткового устаткування. В цистерну можна завантажувати озонований розчин, що буде випаровуватися та розпилюватися у вигляді пересиченого пару з подальшою конденсацією газоаерозольної суміші з заданими параметрами: величиною конденсованої частки, густиною та швидкістю утворення потоку. Напрямами подальшого розвитку запропонованого способу постановки газоаерозольної вертикальної завіси є дослідження режимів роботи агрегатів-аерозолеутворювачів, опрацювання оптимального складу і витрати сумішей та дослідження можливостей інших речовин-дегазаторів окрім озону.

Переваги запропонованого підходу у порівнянні з дією вертикальної газоповітряної завіси полягають у тому, що крім процесу розсіювання ТР, у ХЗП відбувається хімічна реакція знешкодження ТР відповідними речовинами-дегазаторами з супутнім поглинанням аерозольними частками, а утворення та керування такими завісами можливе з застосуванням штатних технічних засобів військ РХБ захисту.

Техніко-економічне обґрунтування застосування запропонованої технології полягає у забезпеченні досягнення цілей, неможливих ніякими іншими відомими методами, – надійний захист населення без його евакуації і припинення економічної діяльності в регіоні у разі аварій з хімічно небезпечними речовинами.

нами. економічний і соціальний ефекти, що досягаються в кожному випадку визначаються індивідуально.

Основними перевагами пропонованої системи можна вважати наступні.

1. Ефективність: згідно розрахунку за методиками МЧС Росії на прикладі з аварією на арсеналі в с. Леонідовка (Росія) показано, що при розливі 1 т зарину зона зараження, що визначалась за пороговою токсодозою, складає 14,8 км. і в неї потрапляє значна частина м. Пензи або смт. Зарічний (повністю при протилежному напрямі вітру). При дії захисної газоповітряної завіси висотою 40 м зона зараження скорочується до 1 км., а при висоті 120 м відсутня взагалі.
2. Оперативність: запропонований спосіб захисту населення припускає швидке (протягом декількох хвилин) приведення в дію стаціонарного пристрою для створення завіси. У випадку застосування мобільних груп ліквідації наслідків час приведення в дію визначається швидкістю прибуття до району події.
3. Надійність: завіса з автономним енергопостачанням забезпечує безвідмовну роботу за будь-яких умов.
4. Область застосування: ефективність завіси не залежить від виду речовини. Тому вона може застосовуватися для будь-яких СДОР.
5. Соціальний ефект: питання безпеки зберігання і знищення хімічної зброї, безаварійного функціонування підприємств хімічної промисловості викликають у населення, громадськості, засобів масової інформації і регіональних органів влади хворобливе відношення. Впровадження на практиці пропонованого способу, що дозволяє реалізувати додатковий ефективний рівень захисту населення, однозначно приведе до зниження соціальної напруженості і дозволить Україні успішніше забезпечити захист цивільного населення.

Література: 1. Александров В.Н. Отравляющие вещества. – М.: Воениздат, 1990. – 186 с. 2. Matouseh J.R., Санобработка личного состава после использования NBC и террористических химических агентов биологических и радиологических нападений.// Медико-биологические проблемы противолучевой и противохимической защиты: Сборник материалов Российской научной конференции. СПб, 20-21 мая 2004, с.389-390. 3. „Дослідження дегазації токсичних речовин шляхом застосування пероксикарбонових кислот”: Звіт про НДР “КОНТУР” (проміжний) № 3801 / Харківський інститут танкових військ НТУ “ХПІ”: МОУ.– Харків, 2004.–61 с. 4. Патент РФ № 2255779, Available at: <http://www.info-tech.com.ua> 5. Патент РФ № 2232039, Available at: <http://www.info-tech.com.ua> 6. Патент РФ №2255780, Available at: <http://www.info-tech.com.ua> 7. Г.Вахваков, Работа вентиляторов в сети, М., Стройиздат, 1975. 8. Г.М. Алиев, Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов, Справочник, М., Металлургия, 1986. 9. В.М. Эльтерман, Воздушные завесы, Издательство «Машиностроение», Москва, 1966. 10. Пат. № 4287135 США МКИ С 07 С 179/10 (НКИ 260/502 R) Stabilized diperoxyalkanedionic acids and aromatic peroxydicarboxylic acids / Stober R., Wirthwein R., Hase C. – № 83654. – Заявл. 11.10.79; Опубл. 1.09.81. 11. Silbert L.S., Siegel E., Swern D. Peroxides. New method for the direct preparation of aromatic and alifatic peroxyacids // J. Org. Chem. – 1962. – V.27, № 4. – P.1336-1342. 12. Oslo Convention for the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter, dated 29 December 1972 and amended on 12 October 1978 and 1 December 1980. Available at: <http://sedac.ciesin.org/entri/texts/marine.pollution.dumping.of.wastes.1972.html> 13. A. Johnson-Winegar. The U.S. Chemical Demilitarization Program, Statement before the Senate Armed Services Committee, Sub-Committee on Emerging Threats and Capabilities, U.S. Senate, 12 July 2001.

ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОЕ ПОКРЫТИЕ $\{Cr + (TiCr)N\} \times 10$ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИИ

Мацевитый В.М., докт. техн. наук, **Похмурский В.И.**, член-корреспондент НАН Украины, **Калахан О.С.**, докт. техн. наук, **Казак И.Б.**, канд. техн. наук, **Вакуленко К.В.**, канд. техн. наук, **Ляшок С.В.**

(г. Харьков, г. Львов, Украина)

Investigations of influence of multilayer vacuum-plasma coating $\{Cr + (TiCr)N\} \times 10$ on cracking stability of contacting steel samples in fretting corrosion conditions have been carried out. It is set out, that the coating ensures increasing samples durability in 5,15 5,44 and 3,49 folds under the amplitudes of the cyclic stress, correspondingly 100, 150 and 200 MPa.

Как известно [1], одной из причин снижения выносливости металла является фреттинг-коррозия – об этом свидетельствуют качественные (образование изношенных участков с отслоившимися мелкими частицами, зарождение усталостных трещин в местах, подвергающихся фреттинг-коррозии) и количественные данные. Фреттинг-коррозия – это разновидность повреждений от фреттинга, когда продукты разрушения являются результатом химических реакций между составляющими контактирующих поверхностей и окружающей средой. Одним из важных факторов, сокращающих усталостную долговечность металлов в условиях фреттинг-коррозии, является адгезия поверхностей, сопровождающаяся периодическим схватыванием на участках контакта [2]. Уменьшению адгезии способствует использование смазок, неметаллических покрытий и прокладок, а также разные виды химико-термической, химической и электрохимической обработки, поверхностная пластическая деформация. В настоящее время все большее использование находят защитные покрытия, состоящие из карбидов, нитридов и оксидов *d*-переходных металлов и *sp*-элементов, имеющих высокую износостойкость в условиях адгезионно-усталостного изнашивания и низкую адгезионную активность. Целью настоящей работы являлось исследование эффективности многослойного вакуумно-плазменного покрытия, обладающего низкой адгезионной активностью, в качестве защитного в условиях фреттинг-коррозии, возникающей при контакте изделий из стали 20X13.

Образцы стали 20X13 изготавливались из листового проката в нормализованном состоянии в виде пластин разных размеров. Термообработка осуществлялась по режиму: нагрев до 1050 °С, выдержка 40 минут, закалка в масле, отпуск в течение 2-х часов при 700 °С с последующим охлаждением в воде. После термической обработки образцы со стороны больших граней шлифовывали на глубину 0,5 мм. Исследуемые образцы имели такие размеры: длинные образцы 110×14×4 мм, короткие образцы – 33×14×4 мм. Твердость образцов *HRC* 18...20.

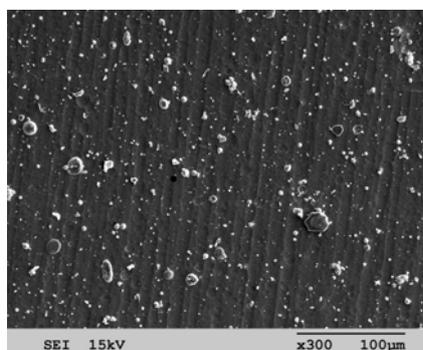


Рис. 1. Структура поверхности покрытия $\{Cr+(TiCr)N\} \times 10$ на образце стали 20X13.

ванном состоянии в виде пластин разных размеров. Термообработка осуществлялась по режиму: нагрев до 1050 °С, выдержка 40 минут, закалка в масле, отпуск в течение 2-х часов при 700 °С с последующим охлаждением в воде. После термической обработки образцы со стороны больших граней шлифовывали на глубину 0,5 мм. Исследуемые образцы имели такие размеры: длинные образцы 110×14×4 мм, короткие образцы – 33×14×4 мм. Твердость образцов *HRC* 18...20.

Покрытие наносили на модернизированной установке «Булат-6» на две большие грани длинных образцов и на одну большую грань коротких образцов. Разработанное покрытие состоит из слоев Cr толщиной $\sim 0,1$ мкм и слоев (TiCr)N толщиной ~ 1 мкм. Общее количество слоев в покрытии – 20. Символическая запись «конструкции» – $\{Cr + (TiCr)N\} \times 10$. Полученный фазовый состав покрытия гарантирует его низкую адгезионную активность [3, 4].

Исследование структуры поверхности покрытия, представленной на рис. 1, проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-840.

Адгезионная и когезионная прочность покрытия оценивалась методом глубокого проникновения алмазного индентора в поверхность образцов с покрытием.

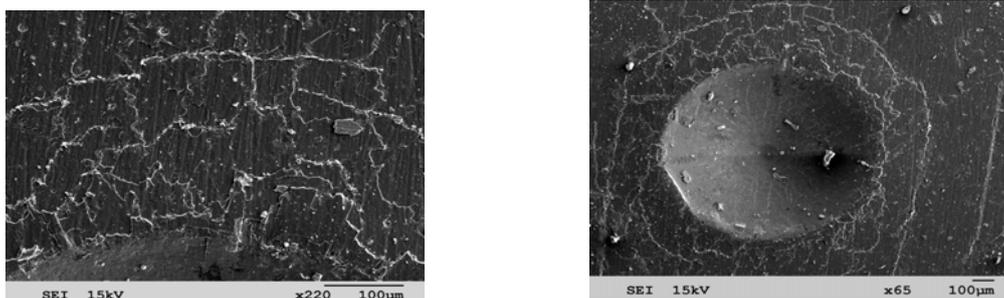


Рис. 2. Изображение отпечатка на поверхности образца с покрытием $\{Cr + (TiCr)N\} \times 10$.

Анализ изображений (на рис. 2а, 2б) позволяет отметить следующее. Присутствуют незначительные по площади участки разрушения покрытия на периферии отпечатков; на конусной поверхности наблюдается несколько элементов разрушения также малой площади. На границах отпечатка на стальном образце, хоть и нет сколов покрытия, наблюдается растрескивание ориентированного характера.

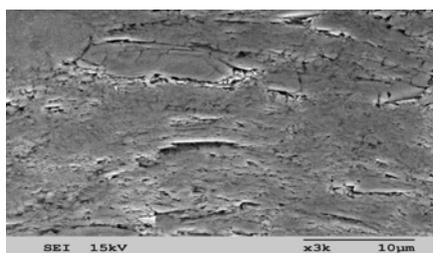


Рис. 3. Элементы разрушения покрытия на конусной поверхности отпечатка.

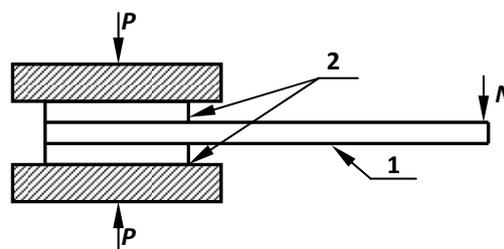


Рис. 4. Схема расположения образцов при испытаниях на фреттинг-усталость: 1 – длинный образец; 2 – короткие образцы, прижатые к образцу 1; P – сжимающая нагрузка соответствует напряжению 100 МПа; N – циклическая нагрузка.

Большее увеличение (рис. 3) позволяет заметить на границах этой зоны элементы послойного скола покрытия в поверхностных слоях. На основании этих результатов можно сделать вывод о том, что покрытие имеет удовлетворительную адгезию к стальным образцам.

Испытания на фреттинг-усталость осуществлялись на стенде, в котором размещение взаимодействующих образцов по отношению к нагрузке соответствует схеме на рис. 4. Образцы располагали таким образом, чтобы поверхности образцов с покрытиями контактировали друг с другом.

Результаты испытаний на фреттинг-усталость приведены в таблице.

Таблица

Влияние покрытия на фреттинг-усталость образцов из стали 20X13

Амплитуда циклического напряжения, МПа	Исследуемые образцы	
	Вариант 0	Вариант 1
	Длинный образец – исходная сталь 20X13 в контакте с короткими образцами из той же стали	Длинный образец – сталь 20X13 с покрытием $\{Cr + (TiCr)N\} \times 10$ в контакте с короткими образцами из стали 20X13 с тем же покрытием
	Количество циклов до разрушения (млн.)	
100	0,532	2,740
150	0,217	1,180
200	0,117	0,408

Полученные результаты свидетельствуют о том, что с увеличением циклической амплитуды в условиях фреттинг-коррозии количество циклов до разрушения снижается как в случае контакта образцов с покрытием, так и без покрытия. Вместе с тем при наличии покрытия на образцах существенно увеличивается число циклов до разрушения: в 5,15; 5,44 и 3,49 раз при амплитудах циклического напряжения 100 МПа, 150 МПа и 200 МПа соответственно, на основании чего можно сделать вывод о высокой эффективности рассматриваемого покрытия как защитного в условиях фреттинг-коррозии.

Литература: 1. Шевеля В.В., Калда Г.С. Фреттинг-усталость металлов. – Х.: Поділля, 1998. – 299 с. 2. Голего Н.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В. Фреттинг-коррозия металлов. – К.: Техніка, 1974. – 272 с. 3. Вакуленко К.В. Адгезия и когезия нитридных вакуумно-плазменных покрытий многослойной конструкции / К.В. Вакуленко, В.В. Белозеров, И.Б. Казак, А.И. Махатилова, В.М. Мацевитый // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – № 4. – С. 10–12. 4. Адгезионная и когезионная прочность многослойных вакуумно-плазменных покрытий / К.В. Вакуленко, И.Б. Казак, Ю.В. Кунченко, В.М. Мацевитый // Физические и компьютерные технологии: 13 межд. науч.-техн. конф., 19 апр. 2007 г.: сб. трудов. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2007. – С. 376–379.

УДК 620.179.1:621.317.42:621.78

ВЛИЯНИЕ КОВКИ НА КОЭРЦИТИВНУЮ СИЛУ СТАЛИ 14X17N2 ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ И ВЫСОКОГО ОТПУСКА

Безлюдько Г.Я., канд. техн. наук, **Мацевитый В.М.**, докт. техн. наук, **Казак И.Б.**, канд. техн. наук, **Соломаха Р.Н.**, **Вакуленко К.В.**, **Белоус Е.В.**
(г. Харьков, Украина)

The effect of forging on the coercive force of heat-treated steel 14CH17N2. It is shown that by forging samples are improving and a decrease in coercive force.

При эксплуатации ответственного и дорогостоящего оборудования необходимо использовать эффективные методы контроля состояния металлических изделий находящихся в тяжёлых условиях нагружения. В настоящее время всё чаще применяются неразрушающие магнитные методы контроля.

В данной работе исследовалось влияние пластической деформации на образцы из нержавеющей, жаропрочной стали мартенсито – ферритного класса 14X17H2, которая обычно применяется для рабочих лопаток, дисков, валов, втулок, крепежных деталей, деталей компрессорных машин, деталей, работающих в агрессивных средах и при пониженных температурах.

Цель работы состоит в исследовании влиянияковки (при комнатной температуре) на коэрцитивную силу стали 14X17H2 после улучшения.

Результаты и их обсуждение. Образцы для испытаний были изготовлены в виде прямоугольных пластин размером 170×25×4. Затем они были термообработаны по режиму: закалка от 1000 - 1050°С в масле; отпуск при 650°С, с выдержкой 2 часа с последующим охлаждением в воде. В результате термообработки микротвёрдость стали составила НВ 2000 МПа.

Было установлено, что коэрцитивная сила стали в состоянии поставки составляет ~ 13,6 А/см, а после термической обработки (улучшения) она составляет ~ 21 А/см. Измерения коэрцитивной силы проводились с помощью магнитного структуроскопа КРМ-Ц-К2М [1].

Далее образец был подвергнут ковке при комнатной температуре. Он был прокован на наковальне по большей грани с толщины 4 мм до 3 мм, т.е. на 25%. Микротвёрдость послековки осталась на том же уровне, а коэрцитивная сила упала до уровня ~ 16 А/см.

Таким образом, ковка приводит к уменьшению коэрцитивной силы термически обработанных образцов, что свидетельствует о снижении уровня дефектности кристаллического строения стали в результатековки. По-видимому, ковка сопровождается протеканием процессов динамического отжига и залечивания субмикротрещин под воздействием гидростатической составляющей напряжённого состояния металла при ковке.

Вывод. В результатековки стали 14X17H2 на 25% при комнатной температуре после улучшения наблюдается снижение коэрцитивной силы от 21 до 16 А/см.

Литература: 1. Безлюдько Г.Я. Эксплуатационный контроль усталостного состояния и ресурса металлопродукции неразрушающим магнитным (коэрцитиметрическим) методом // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – Киев, 2003. – №2. – С. 20–26.

УДК 621.327.54.06

АДАПТИВНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МАТРИЦ, СТАНДАРТИЗАЦИИ И УНИФИКАЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ШТАМПОВ (ХЛШ)

Клещев Г.М., канд. техн. наук (г. Одесса, Украина)

We consider adaptive mathematical model using the spatial matrix, standardization and harmonization in the production of stamps.

В настоящее время на рынке появилась тенденция к переходу от единичного и индивидуального производства к серийному производству. Указанное требует новых подходов, как к проектированию, так и к производству штампов холодной листовой штамповки (ХЛШ). В тоже время переход к серийному производству позволяет применить системный подход, стандартизацию и уни-

фикацию сохраняя гибкие, многономенклатурные методы обработки и обеспечивая возможность часто перестраивать производство, затрачивая на это минимум времени и средств. В связи с этим возникла необходимость в технически гибких механизмах, автоматизированных информационных системах и технологиях управления, позволяющих повысить производительность при серийном производстве. На основании изложенного рассматривается системный подход представленный в виде геометрической модели информационного промышленного комплекса.

Как известно информационные системы основываются на входной информации и перерабатывая её создают и передают новую информацию. В тоже время любая система существует не обособленно, а под действием других систем и окружающей среды. Количество таких воздействий безгранично. На рис. 1 представлена схема обобщённой системы с основными характеристиками [1], где:

$$\begin{aligned} X = x_1, x_2, \dots, x_n & \text{ - параметры входа; } Z = z_1, z_2, \dots, z_n & \text{ - параметры системы; } \\ Y = y_1, y_2, \dots, y_n & \text{ - параметры выхода.} \end{aligned} \quad (1)$$

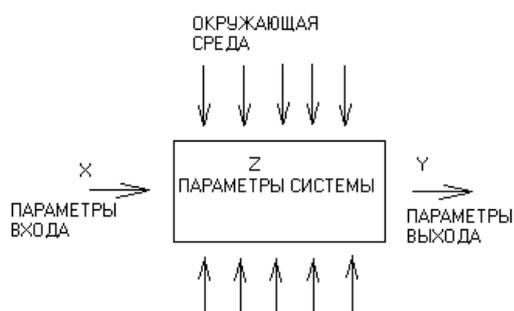


Рис. 1. Обобщённая система.

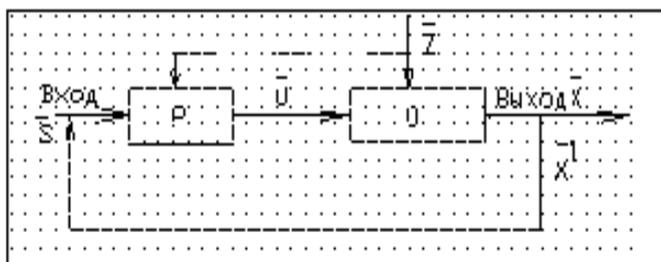


Рис. 2. Схема с обратной связью: P – управляющий орган; U – управляющий вектор; O – управляемый (обрабатывающий) орган; S – вектор входных параметров; X – вектор выходных параметров; X¹ – вектор обратной связи; Z – помеха.

Определение необходимых параметров для конкретной системы из окружающей среды используют автоматизированные схемы с обратной связью (рис.2), которые отбирают "необходимые" воздействия, т.е. на которые настроена эта система. Любой из векторов состоит из N-го количества составляющих, например,

$$S = (s_1, s_2, \dots, s_n) \quad \text{и т.д.} \quad (2)$$

С учётом приведенных составляющих управляющий вектор U примет вид:

$$U = F(S, X^1, Z, X) \quad \text{или} \quad (3)$$

$$U = F \{ (s_1, s_2, \dots, s_n), (x_1, x_2, \dots, x_n), (z_1, z_2, \dots, z_n), (x_1, x_2, \dots, x_n) \}. \quad (4)$$

На основании схемы представленной на рис.2 разработана адаптивная модель (рис. 3), в которую входят[2]: ОС – основной блок; БИЗМ.П.У. – блок изменений производственных условий; БОИ – блок сбора, обработки и передачи информации; БППВ – блок программного поля восприятия; БАА – блок алгоритмов адаптации; БНСИ – блок нормативно- справочной информации; БЗ – блок знаний; БСРиО – блок сравнения, распознавания и оценивания; БУ – блок учителя (блок адаптации).

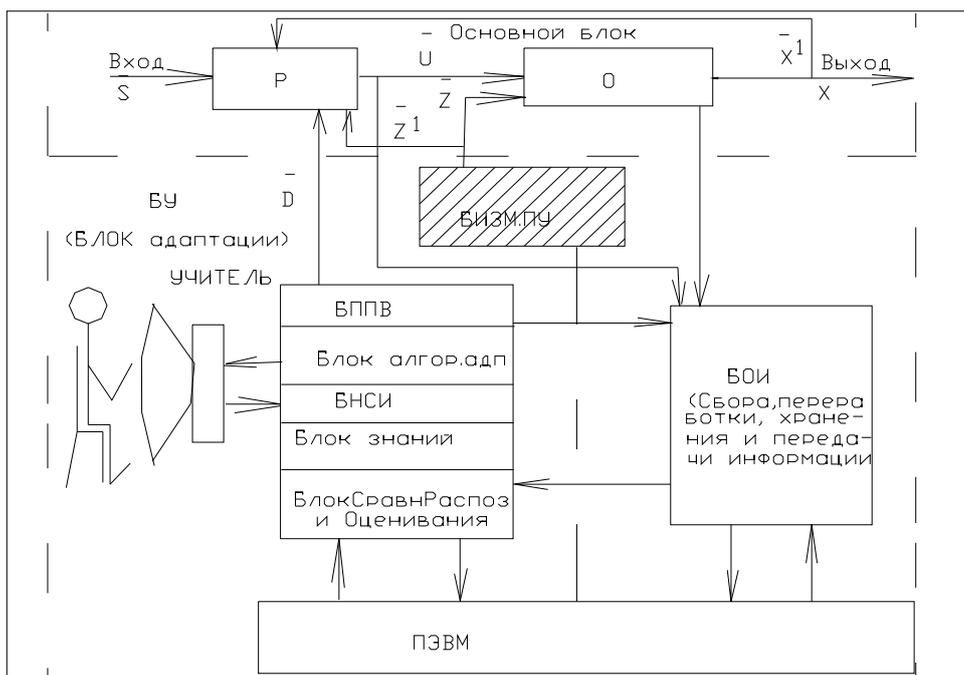


Рис. 3. Адаптивная модель проектирования и изготовления штампов.

Основной блок фактически выполняет те же функции, что и схема, представленная на рис. 2. Блок изменения производственных условий – это все производственные условия, которые возникают в период создания изделия, например, изменение материала, изменение технических требований на изготовление изделия, изменение конфигурации и габаритов изделия и т. д. Блок сбора, переработки и передачи информации – вся информация, которая обрабатывается на ПЭВМ. Блок программного поля восприятия – программы, которые необходимы для решения конкретных задач, на которые настроена данная модель. Блок алгоритмов адаптации – алгоритмы, описывающие постановку конкретных решений по проектированию и изготовлению. Блок нормативно-справочной информации – ГОСТы, ОСТы, методические и руководящие технические материалы, директивы, решения, связанные с конкретной ситуацией и т. п. Блок знаний – знания, накопленные десятилетиями ведущими специалистами, формализованные решения в виде математических формул и математических высказываний, схем, моделей и т. п. Блок сравнения, распознавания и оценивания – для сравнения, распознавания и оценивания используются: структурный подход, аппарат математической лингвистики, разбиение пространства признаков на области, а объектов на классы и т. п. Блок учителя (блок адаптации) – работа блока обеспечивается всеми указанными блоками, а пользователь контролирует и принимает окончательное решение и оно выдаётся как окончательное в виде вектора D .

На основании адаптивной модели, введя вектор состояний A и учитывая вектор D , вектор U можно представить в виде математической модели двух векторов:

$$U = F(A, S); \quad (5)$$

$$A = \Psi(A^0, S, X, Z, D), \quad (6)$$

отсюда

$$U = F[\Psi(A^0, S, X, Z, D) S]. \quad (7)$$

Каждый из векторов может быть представлен в виде матрицы, составляющими которой, в зависимости от рода помех, могут быть, например, следующие компоненты, где:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11}, d_{12}, d_{13}, \dots, d_{1n-1}, d_{1n} \\ d_{21}, d_{22}, d_{23}, \dots, d_{2n-1}, d_{2n} \\ \text{-----} \\ \text{-----} \\ \text{-----} \\ d_{m1}, d_{m2}, d_{m3}, \dots, d_{mn-1}, d_{mn} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где d_{11}, d_{12}, d_{13} – сведения об изменении соответственно конфигурации, например, главного привода, трансмиссии, привода пода и т.п.

Количество составляющих матриц бесконечное множество: допуски, посадки, конструктивные решения, сортамент материалов и т. д. Поэтому, при моделировании сложных систем порядок данных может составлять 10^6 и более. В этом случае нами применялись пространственные матрицы. Теоретические основы математической модели с использованием пространственных матриц представлены в статье [3]. Адаптивная модель используется в интегрированном промышленном комплексе, в системах подготовки производства и изготовления штампов: САПР – в системе автоматизации конструкторско-технологического проектирования, АСТПП – в автоматизированной системе технологической подготовки производства и в гибкой автоматизированной системе производства.

Выводы. Использование фрагментов архитектуры ИПК позволило разработать и внедрить на предприятиях стран СНГ и Украины десятки локальных и интегрированных систем по оптимальному раскрою, конструированию и подготовке управляющих программ для изготовления штампов в производстве. Получен значительный экономический эффект со сроками внедрения от 1,5 года до 0,6 лет. По совокупности требований, предъявляемых к системам, с учётом имеющегося опыта стандартизации и унификации при внедрении и применении в учебном процессе, целесообразно, в дальнейшем, развивать имеющийся опыт.

Литература: 1. Інформаційні системи і технології в економіці: Посібник / За редакцією д.е.н. В.С. Пономаренко. – К.: В. Ц. “Академія”, 2002. 2. Клещёв Г.М. Адаптивная система автоматизированного проектирования штампов. – Серия 6. “Технология тракторного и сельскохозяйственного машиностроения”. Экспресс-информация. – М., 1982. 3. Клещёв Г. М., Богач А.Н., Живица В.И. Математическая модель теоретических основ создания автоматизированных интегрированных систем сельхозпроизводства // V Ювілейна міжнародна науково - технічна конференція. – MOTROL ‘2005, Люблин–Одеса, 2005. 4. Компакт диски–CD AutoCAD^R (2000, 2002).

**КОНЦЕПЦИЯ АДАПТИВНОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ
АВТОМАТИЗИРОВАННОМ СОЗДАНИИ ШТАМПОВ ХОЛОДНОЙ
ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ**

**Моргун Б. А., Клещёв М.Г., Клещёв Г.М., Грабовский О. В.,
Кулиш Н. В. (г. Одесса, Украина)**

We consider the concept of adaptive management model for the automated creation of cold stamping dies.

В последние несколько лет, в связи с нехваткой специалистов по предметной области, сменился спрос рынка от индивидуализации производственных процессов на повышенный интерес к компьютерным системам, посредством которых можно обеспечивать серийное безбумажное, безлюдное и эффективное управление производством. Причём растёт спрос именно на интегрированные системы управления – автоматизация отдельной функции, вроде бухгалтерский учёт, сбыт готовой продукции, расчёт заработной платы считается уже пройденным этапом для многих предприятий [1]. Указанное требует новых подходов, как к проектированию так и к производству изделий. Поэтому, представленная в докладе и описанная в статье [2], модель интеллектуального информационного интегрированного промышленного комплекса (МИИПК) с адаптивной моделью, является своевременной и необходимой. В тоже время переход к серийному производству и компьютерным технологиям, позволяет применить системный подход, стандартизацию и унификацию сохраняя гибкие, многономенклатурные методы обработки и обеспечивая возможность часто перестраивать производство, затрачивая на это минимум времени и средств. В связи с этим возникла необходимость в технически гибких механизмах, автоматизированных информационных системах и технологиях управления, позволяющих повысить производительность при серийном производстве. При создании указанной модели ИИПК с адаптивной моделью управления использован системный подход, что позволяет применять модель во всех областях промышленности: тяжёлой, лёгкой и в создании бытовой технике.

В качестве объекта исследования нами принята структура адаптивной модели информационного интегрированного промышленного комплекса процесса управления механическим производством при создании систем по проектированию и изготовлению штампов: вырубных, совмещённых и последовательного действия холодной листовой штамповки, а в качестве предмета исследований – математический аппарат и модели принятия решений.

Для описания математической модели интегрированного комплекса использованы алгоритмы и методы теории системного анализа, а также синтез оптимизации организационных структур. Рассматриваемая модель базируется на теоретико-множественном подходе, в основе которого лежит представление системы в виде совокупности множества элементов. МИИПК состоит из 15 систем: 9 систем производственных и 6 систем экономического направления, каждая из которых имеет свою базу данных и знаний, объединённых в общий банк данных и знаний предприятия. Шесть систем экономического направления

«отвечают» за: рентабельность, конкурентоспособность, прибыльность, безубыточность предприятия, а так же за прогноз спроса и сбыта продукции на ближайшие годы.

Использование указанной адаптивной модели, МИИИПК и штамп-заготовок при проектировании и изготовлении указанных видов штампов и локальных составляющих систем, позволило провести испытания комплексной (интегрированной) системы на: Одесском заводе штампов НПО «Спецтехоснастка» и Чебаксарком заводе промышленных тракторов. Промышленное испытание показало, что спроектировать и изготовить штамп в металле, при использовании штамп-заготовок, возможно за одни сутки в место традиционных трёх-четырёх лет при неавтоматизированном способе (вручную: проектирование раскроя листа; проектирование деталей и общего вида ещё не существующего штампа; выдача, за год раньше, заказных ведомостей на материалы и комплектующие для изготовления деталей штампа; проектирование технологических карт на каждую деталь спроектированного штампа; промежуточные утверждения у себя и согласования с заказчиком каждого вида разработанных проектов; промежуточная выдача (разработка) конструкторско-технологической документации: калек, синек и т.д.). Безусловно, в каждом случае используются: стандартизация – ГОСТы, ОСТы штамповой оснастки; унификация- использование блоков, пакетов и деталей штампов для разных типоразмеров штампов и как итог- применяется высокоточная измерительная техника контроля, так как штампы являются особо точной инструментальной оснасткой.

Адаптивная модель используется в интегрированном промышленном комплексе, в системах подготовки производства и изготовления изделий: САПР – в системе автоматизации конструкторско-технологического проектирования; АСТПП – в автоматизированной системе технологической подготовке производства; ГАСП – в гибких автоматизированных системах производства.

Использование фрагментов архитектуры МИИИПК позволило разработать и внедрить на предприятиях стран СНГ и Украины десятки локальных и интегрированных систем по: оптимальному раскрою, конструкторско-технологическому проектированию и подготовки управляющих программ для изготовления штампов в металле на производстве. Получен значительный экономический эффект не только от внедрения систем комплекса, но и от изготовления в металле более 1000 штампов.

По совокупности требований, предъявляемых к системам, с учётом имеющегося опыта по стандартизации и унификации, при внедрении на производстве и многолетнего использования моделей в учебном процессе, целесообразно, в дальнейшем развивать имеющийся опыт.

Литература: 1. Гужва В. М. Інформаційні системи і технології на підприємствах. – К.: Київський Національний Економічний Університет, 2001. 2. Gennadiy Kleshchev. Integrated industrial information complex of economic systems control for farming industry // Сб. трудов международной научно-технической конференции: MOTROL'2006, том 8А, Люблин, Польша, 2006. – с. 158-167. 3. Клещев Г.М. Адаптивная система автоматизированного проектирования штампов. – Серия 6. «Технология тракторного и сельскохозяйственного машиностроения». – Экспресс-информация. – М., 1982.

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЛУБИНЫ СТРУКТУРНЫХ
ПРЕВРАЩЕНИЙ МАТЕРИАЛА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОТ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПЛОСКОГО ТОРЦОВОГО
ПЛАНЕТАРНОГО ШЛИФОВАНИЯ**

Подборнов И.В., Свирщев В.И., докт. техн. наук (г. Пермь, Россия)

The analytical description of the depth of the structural transformations of the material surface with a flat machined planetary grinding. The example of calculation.

Для установления влияния интенсивности теплового потока на глубину структурных превращений используем понятие тепловой мощности фазовых превращений $P_{\text{ф.пр.}}$, под которой будем понимать количество тепловой энергии, поглощаемой одновременно одним килограммом превращающегося вещества в течение секунды [1]. Причем структурное превращение происходит только в том случае, если часть плотности тепловой мощности q , развиваемой на поверхности контакта инструмента и детали и поглощаемой телом, превышает мощность фазового превращения.

Мощность фазовых превращений может быть вычислена, например, по экспериментальным результатам моделирования структурных превращений [2], которые дают линейную зависимость максимальной глубины структурно измененного слоя от интенсивности теплового потока (рис. 1). Экстраполяция прямых в область отрицательных значений x показывает, что для осуществления тех или иных структурных превращений на поверхности детали необходимо обеспечить определенный тепловой поток $q > q_0$, причем величина, определяющая степень его возрастания с увеличением глубины искаженного слоя, является постоянной для каждого вида структурных превращений. Поэтому на основании рис. 1 имеем:

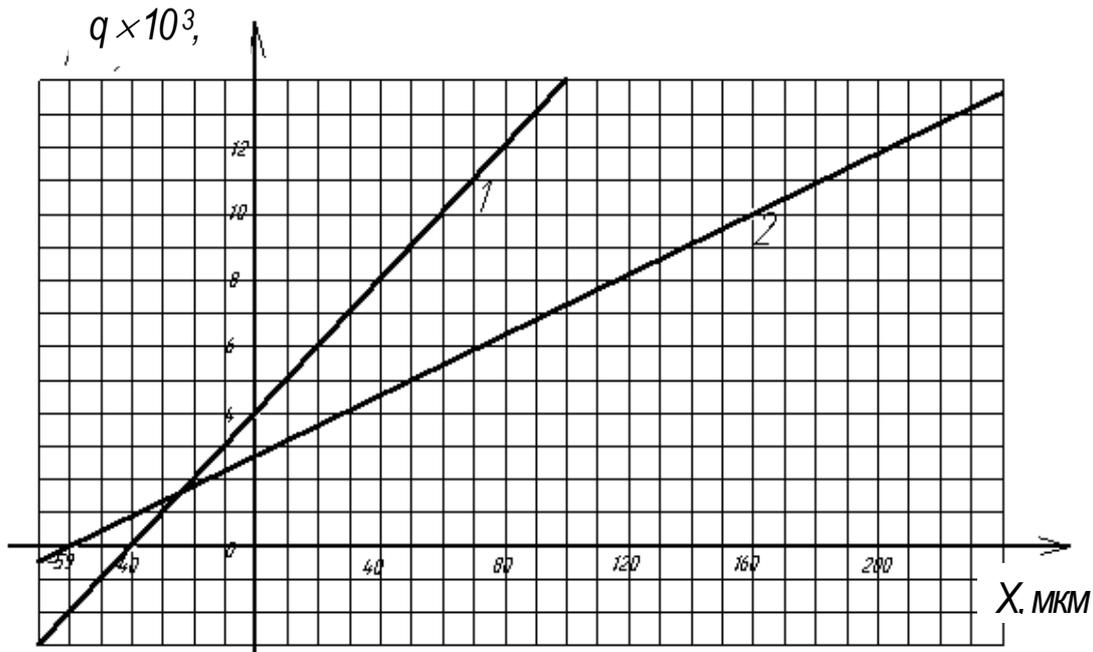
$$P_{\text{ф.пр.}} = \frac{q}{\rho(x + x^0)},$$

где $x^0 = q_0 / P_{\text{ф.пр.}} \rho$, q_0 – плотность теплового потока, при которой не происходит структурных превращений ($q_{0\text{ТР}} = 2,69 \cdot 10^3$ кал/(см²·с); $x_{\text{ТР}}^0 = 59$ мкм; $q_{0\text{А-М}} = 4 \cdot 10^3$ кал/(см²·с)); $x_{\text{А-М}}^0 = 40$ мкм, ρ – плотность материала детали.

Следовательно, для вторично закаленного (А–М) и вторично отпущенного (ТР) слоя мощность фазовых превращений может быть определена равенствами:

$$P_{\text{А-М}}^0 = \frac{4,0 \cdot 4,187 \cdot 10^3 \cdot 10^4}{\rho \cdot 40 \cdot 10^{-6}} = \frac{418,7 \cdot 10^{10}}{\rho} \frac{\text{Вт}}{\text{кг}},$$

$$P_{\text{ТР}}^0 = \frac{2,69 \cdot 10^3 \cdot 4,187 \cdot 10^3 \cdot 10^4}{\rho \cdot 59 \cdot 10^{-6}} = \frac{190,9 \cdot 10^{10}}{\rho} \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}.$$



- 1 – для вторично закаленного слоя;
2 – для вторично отпущенного слоя

Рис. 1. Изменение глубины структурных превращений в зависимости от интенсивности тепловых потоков.

В работе [3] получены выражения для максимальных глубин вторично отпущенного слоя (x_M^{TP}) и вторично закаленного слоя (x_M^{A-M}) в виде:

$$x_M^{TP} = \sqrt[3]{2 \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) \frac{q_0 a t_0}{\rho P_{TP}^0}}, \quad (1)$$

$$x_M^{A-M} = \sqrt[3]{2 \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) \frac{q_0 a t_0}{\rho P_{A-M}^0}}, \quad (2)$$

где a – коэффициент температуропроводности материала детали; t_0 – время прохождения теплового источника над точкой шлифуемой поверхности, $t_0 = \frac{2h}{V_n}$, h – полуширина теплового источника, V_n' – переносная скорость дви-

жения абразивного инструмента $h = \frac{S_{ABK}}{2AK}$, S_{ABK} – площадь зоны контакта шлифовального круга с деталью, AK – ширина зоны контакта; $q_0 = q \cdot \beta$ – плотность теплового потока, поступающая в деталь, $q = \frac{P_z \cdot V_k}{S_{ABK}}$ – общая плотность тепло-

вого потока в зоне резания, P_z – тангенциальная составляющая силы резания, V_k – скорость абразивного резания, β – коэффициент тепловода в деталь,

$\beta = \frac{1}{1 + V_\delta' t \sqrt{\frac{2}{\pi a h V_\delta}}}$, $V_\delta' = \sqrt{V_\delta^2 + V_n'^2 - 2V_\delta V_n' \cos\left(\frac{\pi}{2} \pm \varphi\right)}$, V_δ – скорость про-

дольной подачи детали; t – глубина резания, φ – угол, определяющий положение центра сателлита относительно направления перемещения детали, \pm – соответствует положениям круга выше и ниже направления перемещения детали; P_{TP}^0 , P_{A-M}^0 – мощность фазовых превращений, соответственно для вторично отпущенного и вторично закаленного слоя.

Рассмотрим пример расчета максимальной глубины вторично отпущенного x_M^{TP} и вторично закаленного x_M^{A-M} слоя при следующих условиях плоского торцового планетарного шлифования: круги $650 \times 25 \times 13$ 24A25HSM27K5; материал детали – сталь P18, $a = 5,7 \cdot 10^{-6}$ м²/с; параметры режима шлифования – $t = 2 \cdot 10^{-5}$ м, $V_d = 0,05$ м/с, $V_k = 22,71$ м/с, $V_n' = 11,45$ м/с; геометрические параметры зоны контакта при $\varphi = -10^\circ$ – $S_{ABK} = 0,2 \cdot 10^{-5}$ м², $AK = 0,0005$ м. Значение тангенциальной составляющей силы резания P_z для указанных условий шлифования составляет $P_z = 0,16$ Н. Дополнительные расчетные параметры, входящие в формулы (1), (2): $\beta = 0,116$, $P_{TP}^0 \cdot \rho = 1,909 \cdot 10^{12}$ Вт/кг. $P_{A-M}^0 \cdot \rho = 4,19 \cdot 10^{12}$ Вт/кг.

После подстановки указанных условий шлифования в формулы (1) и (2), получим $x_M^{TP} = 0,49 \cdot 10^{-5}$ м; $x_M^{A-M} = 0,37 \cdot 10^{-5}$ м.

Литература: 1. Кидин И.Н. Физические основы электротермической обработки металлов и сплавов. – М. Металлургия, 1969. – 268 с. 2. Евсеев Д. Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке. – Саратов Изд-во СГУ, 1975. – 126 с. 3. Евсеев Д.Г., Сальников А.Н. Физические основы процесса шлифования. – Саратов: Изд-во СГУ, 1978. – 128 с.

УДК 621.923

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПО ШИРИНЕ ШЛИФУЕМОЙ ДЕТАЛИ ПРИ ПЛОСКОМ ТОРЦОВОМ ПЛАНЕТАРНОМ ШЛИФОВАНИИ

Подборнов И.В., Свирцев В.И., докт. техн. наук (г. Пермь, Россия)

Shows a qualitative assessment of the formation of surface roughness on the width be ground at a flat machined parts planetary grinding.

Для качественной оценки формирования шероховатости поверхности по ширине детали установим число пересечений траекториями абразивных зерен площадок диаметра базовой длины, расположенных на различных участках по ширине детали. Так как при плоском торцовом планетарном шлифовании следы от зерен в виде эпитрохоид расположены хаотично, то направление измерения шероховатости на базовой длине может быть выбрано произвольно. В связи с этим площадку диаметра базовой длины можно представить ограниченной окружностью диаметром l . На рис. 1 показано расположение базовых длин относительно планетарной шлифовальной головки по ширине детали.

Произведем расчет числа пересечений N базовых длин из условия

$$(X_{i,j} - X_0)^2 + (Y_{i,j} - Y_0)^2 \leq \left(\frac{l}{2}\right)^2,$$

$$X_{i,j} = (a + b) \cos \varphi - r_i \cos \left(\frac{a+b}{a} \varphi\right) + 2r_i \sin \frac{\varphi_3}{2} \cdot \sin \left(\frac{a+b}{a} \varphi + \frac{\varphi_3}{2}\right) + \frac{V_d}{\omega_\Gamma} \varphi,$$

$$Y_{i,j} = (a + b) \sin \varphi - r_i \sin \left(\frac{a+b}{a} \varphi\right) - 2r_i \sin \frac{\varphi_3}{2} \cdot \cos \left(\frac{a+b}{a} \varphi + \frac{\varphi_3}{2}\right),$$

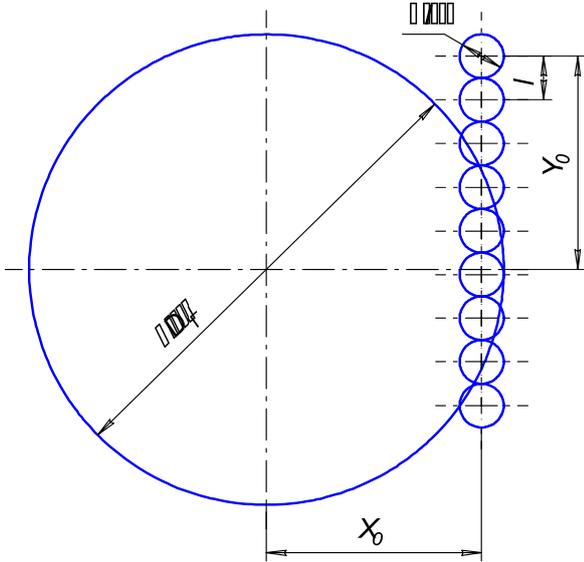


Рис. 1. Расположение базовых длин относительно планетарной шлифовальной головки: D_Γ – диаметр головки, l – базовая длина для определения шероховатости, X_0, Y_0 – координаты центра площадки диаметра базовой длины.

где $X_{i,j}, Y_{i,j}$ – координаты эпитрохоид от произвольных зерен на торцах чашечных кругов при планетарном шлифовании; a, b – радиусы делительной окружности соответственно сателлита и неподвижного зубчатого колеса планетарной головки; φ – угол, определяющий положение центра сателлита относительно оси X ; r_i – радиус расположения зерна на торце чашечного круга; φ_3 – угловая координата зерна; V_d – скорость продольной подачи детали; ω_Γ – угловая частота вращения водила планетарной головки.

Найдем производные от $X_{i,j}, Y_{i,j}$ по φ :

$$\frac{dX_{i,j}}{d\varphi} = -(a + b) \sin \varphi + r_i \left(\frac{a+b}{a}\right) \sin \left(\frac{a+b}{a} \varphi\right) + 2r_i \sin \left(\frac{\varphi_3}{2}\right) \left(\frac{a+b}{a}\right) \cos \left(\frac{a+b}{a} \varphi + \frac{\varphi_3}{2}\right) + \frac{V_d}{\omega_\Gamma};$$

$$\frac{dY_{i,j}}{d\varphi} = (a + b) \cos \varphi - r_i \left(\frac{a+b}{a}\right) \cos \left(\frac{a+b}{a} \varphi\right) + 2r_i \sin \left(\frac{\varphi_3}{2}\right) \left(\frac{a+b}{a}\right) \sin \left(\frac{a+b}{a} \varphi + \frac{\varphi_3}{2}\right).$$

Введем обозначения: $\frac{dX_{i,j}}{d\varphi} = A$; $\frac{dY_{i,j}}{d\varphi} = B$.

При определении числа пересечений важно установить дискрету по углу поворота $d\varphi$ водила планетарной головки из условия одноразовой фиксации пересечения площадки диаметра базовой длины траекториями абразивных зерен. Примем дискрету по углу поворота водила $d\varphi$ при расчете траекторий из условия:

$$(A^2 + B^2) d^2 \varphi = l^2 + 10^{-10}. \text{ Отсюда } d\varphi = \sqrt{\frac{l^2 + 10^{-10}}{A^2 + B^2}}, \quad M = \frac{G}{d\varphi}, \text{ где } M \text{ – число разбиений}$$

угла φ за поворот планетарной головки на G ; G – число оборотов головки (в радианах) при перемещении ее на величину $D_\Gamma + l$ с заданной скоростью V_d .

Расчет числа пересечений площадок диаметра базовой длины по ширине шлифуемой детали выполнен для следующих условий шлифования: конструктивные и кинематические параметры планетарной шлифовальной головки – $D_{\Gamma} = 0,15$ м, 4 шлифовальных круга, $\omega_{\Gamma} = 150,72$ с⁻¹; конструктивные параметры и характеристика абразивного инструмента – 6 50×30×13 24A25НСМ27К5; скорость продольной подачи детали $V_o = 0,05; 0,08; 0,17; 0,25; 0,33$ м/с; базовая длина – $l = 0,0025$ м; расположение центра окружности площадки базовой длины по ширине шлифуемой детали – $X_o = (D_{\Gamma} - l)/2$, $Y_o = 0, D_{\Gamma}/2 - (d_n + d_e)/2, (D_{\Gamma} - l)/2$, где d_n, d_e – соответственно наружный и внутренний диаметры торца чашечного круга. Рассчитывались траектории движения режущих зерен, составляющих 10% от количества всех зерен, расположенных на торцах чашечных кругов [1.]. Причем принималось, что эти 10% зерен равномерно расположены на режущих ленточках чашечных кругов.

Результаты расчета числа пересечений площадок диаметра базовой длины траекториями режущих зерен, расположенных на торцах шлифовальных кругов приведены в табл. 1 и проиллюстрированы на рис. 2.

Таблица 1

Число пересечений N площадок диаметра базовой длины l

$V_d, \text{ м/с}$ \ Y_o	0	$D_{\Gamma} / 2 - (d_n + d_e) / 2$	$(D_{\Gamma} - l) / 2$
0,05	15435	20950	5350
0,08	9217	11689	2947
0,17	3489	4580	748
0,25	1822	2513	159
0,33	1093	1557	28

N

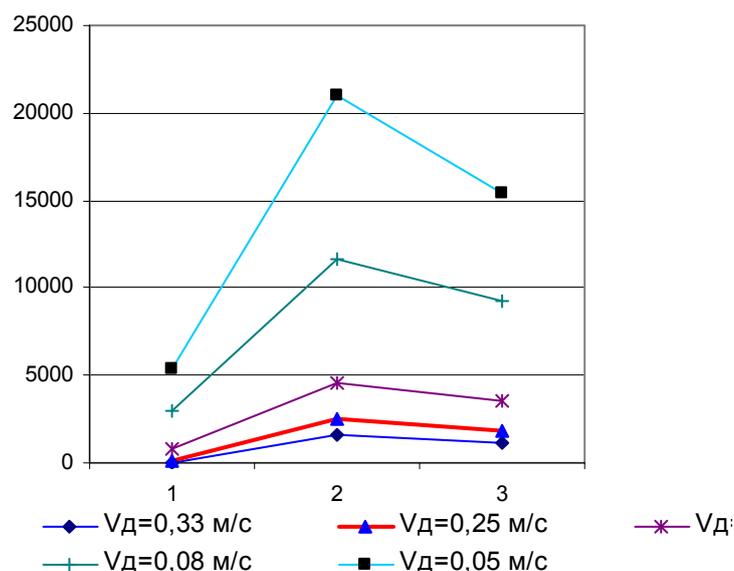


Рис. 2. Число пересечений площадок диаметра базовой длины по ширине детали. 1 – $Y_o = (D_{\Gamma} - l) / 2$, 2 – $Y_o = D_{\Gamma} / 2 - (d_n + d_e) / 2$, 3 – $Y_o = 0$.

Анализ зависимостей показывает, что по ширине детали число пересечений площадок диаметра базовой длины, а соответственно, и шероховатость не постоянна. Наименьшая шероховатость поверхности получается на расстоянии равном $D_{\Gamma} / 2 - (d_n + d_e) / 2$ от оси симметрии планетарной головки, а наиболее худшая шероховатость, судя по числу пересечений, будет на расстоянии $(D_{\Gamma} - l) / 2$.

Литература: 1. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.

УДК 621.923

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОСТИ ПРОЦЕССА ПЛОСКОГО ТОРЦОВОГО ПЛАНЕТАРНОГО ШЛИФОВАНИЯ

Подборнов И.В., Свирцев В.И., докт.техн.наук (г. Пермь, Россия)

The analytical description of the process of heat-stressed flat machined planetary grinding. The example of calculating the temperature.

Для постановки тепловой задачи при плоском планетарном шлифовании зону контакта круга с деталью схематизируем следующим образом (рис. 1): заменим площадь криволинейного треугольника ABK площадью прямоугольника $A'K''A''$, приняв $A''K''=AK$. В этом случае вторая сторона прямоугольника $A'A'' = \frac{S_{ABK}}{AK}$, полуширина источника тепла $h = \frac{A'A''}{2}$, где S_{ABK} – площадь криволинейного треугольника ABK . С учетом этого может быть поставлена следующая тепловая задача: по полупространству, теплофизические характеристики которого λ, C_v со скоростью V_n' в положительном направлении оси Z движется двумерный источник тепла (2П2) шириной $A'A''$ и длиной $A''K''$, плотность теплового потока которого g_0 равномерно распределена по площадке контакта $A'K''A''$. Требуется найти квазистационарное распределение температуры в поверхностном слое шлифуемой детали из решения дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + V_n' \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

при следующих начальных и граничных условиях:

$$\theta \Big|_{\substack{\tau=0 \\ x=\infty \\ y=\pm\infty \\ z=\pm\infty}} = 0; \quad -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{\substack{x=0 \\ 0 \leq Z \leq A'A'' \\ -\frac{A''K''}{2} \leq y \leq \frac{A''K''}{2}}} = g_0; \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{\substack{x=0 \\ A'A'' < Z < 0 \\ \frac{AK}{2} < y < -\frac{AK}{2}}} = 0,$$

где θ – температура; τ – время; a – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности.

Согласно методу источников тепла решение диффуравнения в установившемся режиме шлифования для полосового источника (2П1) имеет вид [1]:

$$\theta = \int_0^{A'A''} dz' \int_{-\infty}^{\infty} dy' \int_0^{\infty} \frac{g_0 d\tau'}{C_v (4\pi a (\tau - \tau'))^{3/2}} \exp \left\{ - \frac{x^2 + (y - y')^2 + [z - z' + V_n' (\tau - \tau')]^2}{4a(\tau - \tau')} \right\}, \quad (1)$$

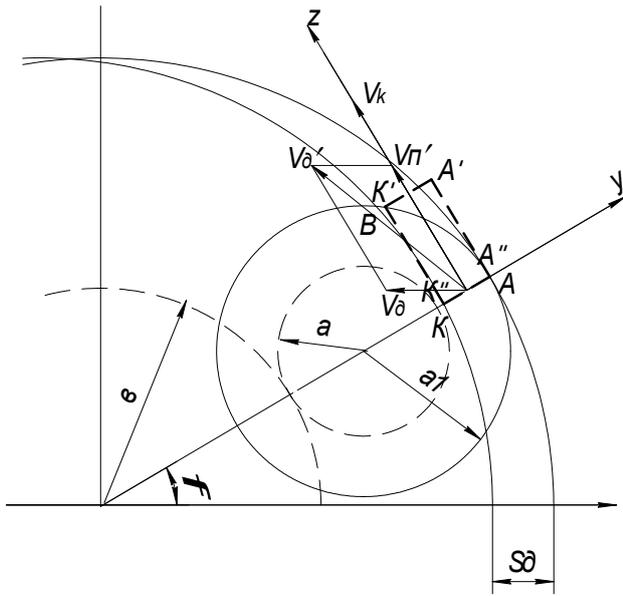


Рис. 1. Схема для расчета средней контактной температуры при плоском торцовом планетарном шлифовании.

контактной температуры примем $X = 0$:

$$\theta(0, Z) = \frac{2g_0 a}{\pi \lambda V_n} \int_{Z-H}^{Z+H} \exp(-\xi) K_0(\xi) d\xi = \frac{2g_0 a}{\pi \lambda V_n} (J(Z+H) - J(Z-H)). \quad (3)$$

Выражение для расчета средней контактной температуры $\bar{\theta}$ при плоском торцовом шлифовании может быть получено интегрированием (3) по координате Z . При больших скоростях источника V_n' ($H > 10$) оно примет вид

$$\bar{\theta} = \frac{8g_0 a}{3\sqrt{\pi} \lambda V_n} \sqrt{H}, \quad (4)$$

где $g_0 = g_1 \beta$, $g_1 = \frac{P_z V_k}{S_{ABK}}$, P_z – тангенциальная составляющая силы резания, V_k –

скорость абразивного резания; β – коэффициент тепловода в деталь;

$$\beta = \frac{1}{1 + V_\delta' t \sqrt{\frac{2}{\pi a h V_\delta}}}, \quad V_\delta' = \sqrt{V_\delta^2 + V_n'^2 - 2V_\delta V_n' \cos\left(\frac{\pi}{2} \pm \varphi\right)}, \quad V_\delta$$

– скорость подачи детали; t – глубина резания, φ – угол, определяющий положение центра сателлита относительно направления перемещения детали, \pm – соответствует положениям круга выше и ниже направления перемещения детали.

Рассмотрим пример расчета средней контактной температуры $\bar{\theta}$ при следующих условиях плоского торцового планетарного шлифования: материал детали – сталь Р18, $a = 5,7 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda = 27,2$ Вт/м²С; круги – 6 50x25x13 24A25НСМ27К5; параметры режима шлифования – $t = 4 \cdot 10^{-5}$ м; $V_\delta = 0,17$ м/с, $V_n' = 11,45$ м/с, $V_k = 22,71$ м/с; геометрические параметры зоны контакта при

где x' , y' , z' – координата точки тела, в которой мгновенно выделилось количество тепла $dQ = g_0 dy' dz' d\tau'$.

После интегрирования и преобразований [1], получим

$$\theta(X, Z) = \frac{2g_0 a}{\pi \lambda V_n'} \int_{Z-H}^{Z+H} \exp(-\xi) K_0(\sqrt{X^2 + \xi^2}) d\xi, \quad (2)$$

где $X = \frac{V_n' x}{2a}$; $Z = \frac{V_n' z}{2a}$; $H = \frac{V_n' A'A''}{4a}$;

$$\xi = \frac{V_n' (z - z')}{2a}; \quad K_0$$

– интегральное представление модифицированной функции Бесселя второго рода нулевого порядка.

Для расчета поверхностной

$\varphi = 0 - S_{ABK} = 1,32 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$, $AK = 0,001771 \text{ м}$. Значение тангенциальной составляющей силы резания $P_z = 29,96 \text{ Н}$. Дополнительные расчетные параметры, входящие в формулу (4): $g_I = 4,64 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$, $\beta = 0,14$, $g_0 = 64,96 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$, $h = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $H = 3,7 \cdot 10^3$. После подстановки указанных условий шлифования в формулу (4), получим $\bar{\theta} = 33,8 \text{ }^\circ\text{С}$.

Литература: 1. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.

УДК 621.91.01

ВЛИЯНИЯ КАРБИДООБРАЗУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ВОЛЬФРАМА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ВЫСОКОХРОМИСТОГО КОМПЛЕКСНОЛЕГИРОВАННОГО ЧУГУНА В ЛИТОМ И ТЕРМООБРАБОТАННОМ СОСТОЯНИЯХ

Скобло Т.С., докт. техн. наук; **Власовец В.М.**, канд.техн.наук;
Клочко О.Ю., аспирант (г. Харьков, Украина)

The influence of tungsten on the features' level of the cast iron obtaining different concentration of the component has been studied. The influence of tungsten on the precipitation age hardening degree during the founding and heat treating has been drawn out.

Введение. Высокохромистые чугуны являются материалом, часто используемым для изготовления деталей машиностроения и металлургического оборудования. Они отличаются высокими эксплуатационными свойствами. Но одним из существенных недостатков такого материала является наличие большой доли остаточного аустенита. Доля его выделения зависит не только от условий кристаллизации отливки, но и от химического состава и особенно карбидообразующих элементов [1-3]. Их ввод, в небольших количествах, обеспечивает образование карбидов и уменьшает долю остаточного аустенита уже в литом состоянии. Применение высокотемпературной термической обработки для распада остаточного аустенита в высокохромистых чугунах практически невозможно, особенно при производстве массивных отливок. В литературе, патентах и зарубежных проспектах отсутствуют данные о разработках, направленных на уменьшение доли остаточного аустенита и повышение технологичности высокохромистых чугунов при производстве и эксплуатации.

1. Цель работы. Целью данной работы является рассмотрение проблемы уменьшения доли остаточного аустенита путем оптимизации химического состава дополнительным легированием вольфрамом и термической обработкой.
2. Задачи. Рассмотрение влияния карбидообразующего элемента вольфрама на строение расплава, процессы кристаллизации и структурообразования, физико-механические и эксплуатационные свойства высокохромистого комплекснолегированного чугуна в литом и термообработанном состояниях
3. Результат исследования. Карбидообразование напрямую связано с природой жидкого сплава и с теми изменениями, которые вносит легирующий элемент в строение жидкой фазы.

Жидкое состояние. Степень уплотнения хромистого расплава от 1550°C до температуры начала кристаллизации аустенита $t_{л}$ резко уменьшается (в 2,2–2,4 раза) по мере повышения содержания карбидообразующего элемента вольфрам. Такой расплав подвергается усадке в меньшей степени, чем хромистый при охлаждении до $t_{л}$. При этом коэффициент термического сжатия также существенно уменьшается (в 2,0–5,0 раз), что свидетельствует о малой величине усадки жидкой фазы в зависимости от температуры охлаждения.

Кристаллизация. Увеличение содержания W (2,5–25,0 мас.%) способствует постоянному росту значений температуры начала кристаллизации аустенита $t_{л}$, а значения температуры начала эвтектического превращения $t_{э}^n$ снижаются. Температура конца эвтектического превращения $t_{э}^к$ изменяется по сложной зависимости: минимум значения наблюдается при 12,5 мас.% W, т. е. температурный интервал кристаллизации эвтектики сначала расширяется до 12,5–15,0 мас.% W, а затем сужается при дальнейшем увеличении концентрации вольфрама до 25 мас.%. Увеличение содержания вольфрама способствует постоянному повышению температуры начала эвтектоидного превращения $t_{э}^i$. Максимальное уплотнение расплава при эвтектическом превращении наблюдалось при 12,5–15,0 мас.% W. По характеру изменений значений температурного интервала кристаллизации эвтектики и уплотнения расплава при 12,5–15,0 мас.% W можно заключить, что при содержании его более 15,0 мас.% чугуна становится по составу заэвтектическим, о чем свидетельствуют данные металлографического анализа [4].

Степень уплотнения расплава при эвтектическом и эвтектоидном превращениях увеличивается по мере повышения концентрации W.

Физико-механические свойства в литом состоянии. Вольфрам резко повышает плотность и уменьшает теплопроводность. Это связано с увеличением дисперсности карбидных частиц и других составляющих чугуна с добавлением вольфрама. Комплексное легирование белого хромистого чугуна в большей степени снижает его теплопроводность, чем при одиночном легировании, следовательно, комплексно-легированные белые чугуны более склонны к образованию трещин в сложных по конфигурации отливках при термообработке.

Влияние вольфрама на жаростойкость (окалийностойкость) существенной роли не играет.

Твердость возрастает и достигает максимального значения при 7,5 мас.% W (52 HRC), а затем стабилизируется на этом уровне. Микротвердость карбидной фазы $(Fe,W)_3C$ составляет 1200 Н₅₀ при 10 мас.% W и 1400 Н₅₀ при 25 мас.% W. Из-за дисперсности карбидных частиц $(Fe,W)_6C$ не удалось измерить их микротвердость. Микротвердость металлической основы возрастает до 550–580 Н₅₀ при 5,0–7,5 мас.% W, а затем не изменяется до 25 мас.% W. Стабилизация микротвердости и твердости металлической основы вольфрамовых чугунов можно объяснить повышением микротвердости карбидных частиц в ферритной матрице [5].

Эксплуатационные свойства в литом состоянии. Относительная износостойкость хромистых вольфрамовых чугунов изменяется от концентрации вольфрама в соответствии с изменениями твердости. Максимальные значения

относительной износостойкости $K_{и}$ наблюдаются при концентрации 10,0 мас.% W ($K_{и} = 1,6$). Следовательно, между твердостью и относительной износостойкостью комплексно-легированного хромистого белого чугуна существует прямая корреляция.

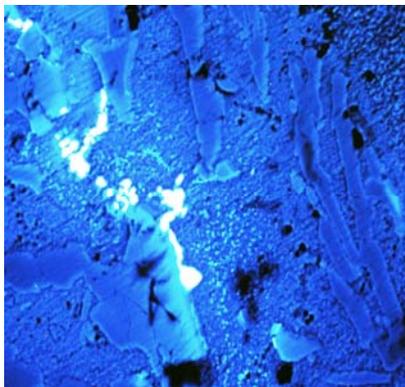
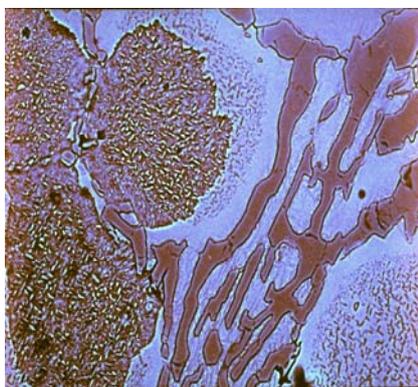
С увеличением содержания вольфрама степень коррозии хромистого белого чугуна уменьшается (возрастает коррозионностойкость) до 10,0 мас.% W. При дальнейшем увеличении вольфрама коррозионная стойкость хромистого чугуна резко снижается. Данное явление связано с измельчением структурных составляющих – металлической основы и карбидных частиц, вследствие чего возрастает количество микрогальванических пар (карбид – металлическая основа).

Вольфрам, входящий в состав карбидов типа $Me_{23}C_6$, Me_7C_3 увеличивает их твердость, а, следовательно, и износостойкость. Помимо этого, вольфрам, упрочняя карбидную фазу, повышает ее устойчивость к хрупкому растрескиванию и вместе с тем дополнительно повышает износостойкость сплава [6].

Структурообразование и результаты элементно-фазового и рентгеноструктурного анализа в литом и термообработанном состоянии.

Исследуя высокохромистые чугуны, необходимо рассмотреть вопрос о полноте процессов распада остаточного аустенита, поскольку наличие его большой доли остаточного аустенита является одним из существенных недостатков таких материалов в эксплуатации.

Высокая концентрация хрома в аустените 7,0-14% в высокохромистых массивных отливках и большая масса металла при кристаллизации, не позволяют получить мартенситной структуры при литье или термической обработке.



а)

б)

Рис.1. Хромистый чугун с (мас.%) а) 0,86W и б) 2,6W в литом состоянии (идентификация осуществлялась микро-рентгеноспектральным методом при увеличении $\times 1000$).

В таких изделиях распад происходит по механизму: аустенит \rightarrow дисперсные спец-карбиды ($Me_{23}C_6$ и Me_7C_3) + легированный феррит. Поэтому основным направлением повышения твердости таких изделий является степень коагуляции выделений таких карбидов и полнота про-

цессов распада остаточного аустенита. Распад остаточного аустенита определяется уровнем его стабильности, который зависит от степени легированности сплава. Поэтому представляется важным оценить количество легирующих элементов, растворяющихся в аустените и выделяющихся в избыточных фазах, и установить в какой период процесса кристаллизации это происходит. Повысить склонность к распаду остаточного аустенита возможно при введении вольфрама.

В работе [7] были исследованы высокохромистые чугуны с добавлением вольфрама в пределах (мас.%): 0,86 – 2,6 W.

В литом состоянии (рис.1) в чугунах, содержащих вольфрам (при 0,2 – 0,5% молибдена), остаточного аустенита меньше - до 60%, чем в чугуне того же состава, но без вольфрама, гораздо больше участков ферритокарбидной смеси повышенной травимости.

Анализируя сплавы с 0,86 - 2,6% вольфрама в литом состоянии видно, что включения, содержащие вольфрам, не являются рельефными, не имеют выступающих границ, а также определенной формы или огранки (рис.1,б). Наблюдаемое свечение этих включений достигалось при исследованиях во вторичных электронах. Установлено [7], что включения (Me,W)C содержат: 7,75 - 8,7% Cr; 1,09% Ni; 0,37 – 0,45% V; до 26,06% Mo; 30 – 38% W; 34 – 47% Fe.

Термообработка – важный этап технологии изготовления массивных отливок с рабочим слоем из высокохромистого чугуна. В технологическом цикле термообработку используют в качестве окончательной операции для придания изделию требуемых свойств и снятия напряжений. Проблема повышения качества рабочего слоя может решаться как оптимизацией химического состава сплава, так и изменением режимов последующей термообработки [8]. При выборе режима термообработки необходимо учитывать исходную структуру высокохромистого сплава. Среди процессов, протекающих при термообработке, ведущую роль играют фазовые превращения в металлической матрице и снятие напряжений. Изменение структурных составляющих матрицы отражается на уровне твердости. Для более полного снятия напряжений и распада остаточного аустенита для массивных изделий из высокохромистого чугуна наиболее оптимальным режимом термообработки является двойной отжиг в интервале температур 450-550⁰С [7, 9]. Сплавы с большей долей остаточного аустенита необходимо подвергать термообработке при более высокой температуре отжига. Поскольку в течение времени выдержки происходит частичная гомогенизация твердого раствора по распределению в нем легирующих элементов, целесообразно выбирать длительность выдержки в зависимости от степени микроликвационной неоднородности структурных составляющих матрицы, оцененной при помощи измерения микротвердости. Учитывая, что в сплаве с 0,86% вольфрама доля остаточного аустенита больше, чем с 2,6% вольфрама в литом состоянии, целесообразно было применить следующую термическую обработку:

- чугуна с вольфрамом до 0,86% – двукратный отжиг при 550⁰С с выдержкой по 8ч;
- с содержанием вольфрама 2,6% – двукратный отжиг при 450⁰С с выдержкой по 3ч на каждой ступени обработки.

По данным рентгеноструктурного и микроструктурного анализов была выявлена микроструктура сплавов, состоящая из карбидов Me₂₃C₆; MeC и матрицы, которая травится (темная) и не травится (светлая). Исследование структуры травящейся матрицы показали, что она соответствует ферритокарбидной смеси (рис.2).

Дисперсионное твердение (выпадение карбидов из аустенита) отмечается уже в процессе длительного охлаждения при кристаллизации отливки. Причем, в чугунах, легированном вольфрамом, карбиды, выделяющиеся при дисперсионном твердении, особенно при содержании его 2,6%, существенно мель-

че (максимальный размер не превышает 0,2 мкм), чем в чугунах того же состава, но без вольфрама, и их общее количество больше (см. рис. 1, рис. 2).

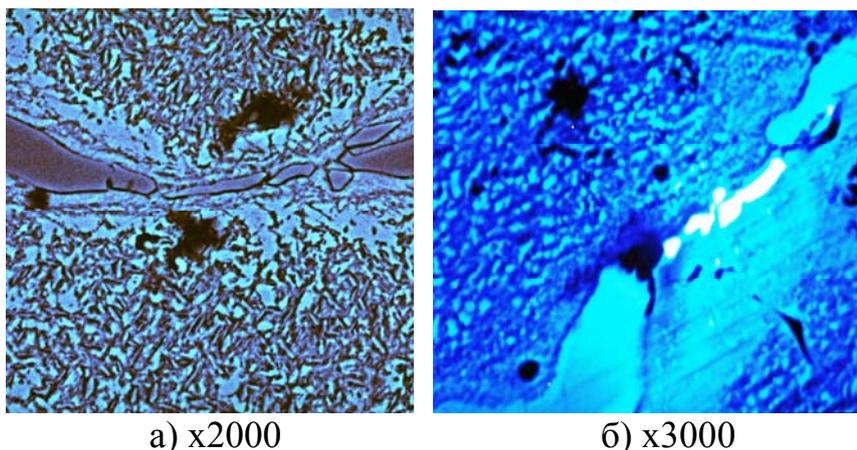


Рис.2. Хромистый чугун с (мас.%) а) 0,86 W и б) 2,6 W после термической обработки (идентификация осуществлялась микрорентгеноспектральным методом).

Дисперсионное твердение способствует повышению твердости только в чугунах с 2,6% вольфрама (с 66HSD до 73 HSD), в остальных заготовках твердость незначительно снижается. После термической обработки в чугунах с 0,86% вольфрама появляется новый тип карбидов MeC.

Содержание компонентов в матрице исследуемых легированных чугунов существенно отличается от чугуна того же состава, но без вольфрама, особенно, количеством хрома и железа [7]. Различную концентрацию этих компонентов можно наблюдать по цвету остаточного аустенита: темному и светлому. В чугунах с вольфрамом в литом состоянии, хрома в светлой матрице в 3 раза больше, чем в чугунах без вольфрама. Железа наоборот меньше примерно на 8%. Из этого можно предположить, что при дисперсионном твердении в этих участках выделяется не только карбидная фаза: $Me_{23}C_6$, MeC, а также интерметаллиды типа FeW. В темной матрице такого резкого отличия по концентрации хрома, не наблюдается. При этом отмечается некоторая неоднородность твердости в литом состоянии, вызванная неоднородностью структуры данных чугунов, что связано с ликвацией вольфрама.

Микрорентгеноспектральный анализ карбидной фазы показывает, что конгломерат карбидов в рассмотренных сплавах представляет собой $Me_{23}C_6$, который имеет близкий химический состав по содержанию железа и хрома. При примерно одинаковом содержании никеля в сплавах его доля большая в карбидной фазе в чугунах с 2,6% вольфрама. В чугунах с 0,86% вольфрама и 0,2% ниобия карбид $Me_{23}C_6$ после термической обработки, содержит ниобий (до 0,09%).

Вольфрам, главным образом, кроме карбидов MeC, сосредоточен в карбидах типа $Me_{23}C_6$. Доля его в последнем достигает 3,81%, а в матрице его количество изменяется от 0 до 1,04%.

В чугунах с 0,86% вольфрама, общая твердость в литом состоянии составляет 74 HSD, коэрцитивная сила до термической обработки характеризуется большим разбросом значений 14 – 36 А/см, а после меньшим: 17 – 22 А/см. Такое изменение уровня коэрцитивной силы характерно для распада аустенита и образования ферритокарбидной смеси. В этом случае твердость после термообработки не превышает 62 HSD.

Чугун с 2,6% вольфрама в литом состоянии имеет твердость ниже, чем с 0,86% вольфрама, за счет большего количества ферритокарбидной смеси (выяв-

лена матрица повышенной травимости с твердостью 61 – 66HSD). Термическая обработка – способствует эффекту дисперсионного твердения – дополнительному выделению карбидов MeC (WC) и $Me_{23}C_6$ (твердость увеличивается с 61 – 66HSD до 73HSD). Выделяющиеся вторичные карбиды вблизи границ бывших аустенитных зерен, очень дисперсные, поэтому коэрцитивная сила не чувствует этого изменения в структуре (фактически не изменяются средние значения).

Легирование высокохромистого чугуна молибденом или вольфрамом по-разному влияет на уровень свойств, что связано с распределением этих компонентов между фазами в чугуне [10]. Особенно заметно различие в уровне микротвердости в матрице чугуна, которая в 1,5 раза выше при добавках W, чем при легировании только молибденом. Такое различие в микротвердости объясняется увеличением доли ферритной составляющей уже в литом состоянии в чугунах с вольфрамом. После термической обработки различие менее заметно, так как происходит дополнительный распад остаточного аустенита.

Выводы. Комплексное легирование высокохромистого чугуна существенно изменяет кристаллизационные параметры, физико-механические и эксплуатационные свойства.

Легирование вольфрамом снижает долю остаточного аустенита и склонность к трещинообразованию при эксплуатации изделий, подвергающихся термоциклическим воздействиям, за счет дисперсионного твердения и формирования ферритокарбидной смеси, а также способствует снижению напряжений (уровень коэрцитивной силы после термической обработки снижается в 2 раза).

Термическая обработка в интервале температур 450 – 550⁰С приводит к снижению неоднородности, усиливает эффект дисперсионного твердения и уменьшает склонность к трещинообразованию при эксплуатации.

Молибден можно заменить вольфрамом и ниобием. При этом следует вводить эти элементы с помощью лигатур, что сократит стоимость изготовления литых изделий.

Литература: 1. Цыпин И.И. Белые износостойкие чугуны. – Структура и свойства. – М.: Металлургия, 1983. – 176 с. 2. Жуков А.А., Сильман Г.И., Фрольцов М.С. Износостойкие отливки из комплекснолегированных белых чугунов. – М.: Машиностроение, 1984. – 104 с. 3. Неижко И.Г., Гаврилюк В.П., Прохоренко Л.Г., Прудников В.С. О формировании микроструктуры высокохромистых чугунов в массивных отливках // Процессы литья. – 2005. – №4. – С. 20-27. 4. Ри Э. Х., Колокольцев В.М., Ри Х. [и др.]. Комплексно-легированные белые чугуны функционального назначения в литом и термообработанном состояниях – Владивосток: Дальнаука, 2006. – 274 с. 5. Колокольцев В.М., Ри Э.Х., Рабзина А.С. [и др.]. Исследование влияния легирования на строение расплава чугуна методом γ -проникающих излучений // Металлургия машиностроения. – 2006. – № 4. – С. 21–24. 6. Шаповалов Ю.С., Бычков Ю.Б., Моисеев В.П. [и др.]. Авторское свидетельство СССР №1008270, кл. С22 С37/06, 1981. 7. Скобло Т.С., Власовец В.М., Ключко О.Ю. Влияние добавок вольфрама на структуру и свойства высокохромистого чугуна // Технічний сервіс АПК, техніка та технологія у сільськогосподарському машинобудуванні: Вісник ХНТУСГ, вип.81 – Харків. – 2009. 8. Садовский В.М. Влияние микроструктуры высокохромистого чугуна на трещиностойкость // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2002. – №2. – С. 35-36. 9. Куцова В.З., Ковзель М.А., Кравченко Г.В. Структура, фазовий склад і властивості високохромистого чавуну після різних режимів термічної обробки // Металознавство та обробка металів. – 2007. – №4. – С. 19-23. 10. Tungsten substitutes for scarce molybdenum in cast iron. – Modern Castings, 1975, vol.47, №5, p.52

УДК 621.91.10

ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ В ПРОЦЕССЕ КОМПЛЕКСНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА

Тимофеева Л.А., докт. техн. наук, Коломиец В.В., докт. техн. наук,
Пугятина Л.А., канд. техн. наук, Лалазарова Н.А., канд. техн. наук
(г. Харьков, Украина)

The method of the complex mechanical handling for details from high strength cast iron is developed by an instrument from a hard alloy and superhard materials.

Значительного улучшения качества машин, повышения их долговечности и большой экономии металла в машиностроении можно достичь применением высококачественных, высокопрочных конструкционных материалов, а также внедрением в производство прогрессивной технологии их механической обработки и поверхностного упрочнения.

В настоящее время все более широкое применение в машиностроении (в т.ч. на железнодорожном транспорте) находит высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧШГ). Благодаря своим физико-механическим и литейным свойствам он с успехом может использоваться вместо дорогого стального проката, серого и ковкого чугунов [1, 2].

Постановка проблемы. Требования к ВЧШГ как к конструкционному материалу непрерывно возрастают по мере увеличения нагрузок на детали в машинах и узлах. Поэтому на современном этапе актуальной является проблема создания эффективных методов окончательной механической обработки и поверхностного упрочнения с целью обеспечения необходимых эксплуатационных свойств поверхностного слоя чугунных деталей (износостойкость, контактная жесткость, усталостная прочность и т.д.), в т.ч. с использованием инструмента из синтетических сверхтвердых материалов на основе нитрида бора.

Состояние вопроса. Анализ публикаций показал, что работ, в которых комплексно рассматриваются вопросы обработки резанием и поверхностного упрочнения высокопрочного чугуна, а также работоспособности инструмента в зависимости от структуры и свойств чугуна, практически нет, что и сдерживает широкое внедрение этого перспективного конструкционного материала в производство.

Предлагаемый способ комплексной механической обработки деталей из высокопрочного чугуна инструментом из твердого сплава и СТМ позволяет усовершенствовать процесс чистовой механообработки и поверхностного упрочнения чугунных деталей. Такая технология является ресурсосберегающей и экологически чистой, позволяющей во многих случаях заменить традиционную поверхностную термическую (закалка ТВЧ) и химико-термическую обработку (азотирование, карбонитрирование) высокопрочного чугуна, в процессе которых используются токсичные для человека среды, а также исключить из технологического цикла малоэффективные операции абразивного шлифования.

Цель работы. Целью данной работы является определение закономерностей формирования физико-механического состояния поверхностного слоя в процессе комплексной механической обработки высокопрочного чугуна с уче-

том особенностей его структуры и свойств и на этой основе – совершенствование технологии финишных методов обработки и поверхностного упрочнения чугунных деталей.

Формирование поверхностного слоя в процессе комплексной механической обработки деталей из высокопрочного чугуна. Разработанная технология комплексной механической обработки деталей из высокопрочного чугуна состоит из двух этапов: лезвийно-упрочняющей обработки и последующего алмазного выглаживания. Суть лезвийно-упрочняющей обработки состоит в образовании в процессе резания (при точении) такого теплонапряженного состояния, которое вызывает в поверхностном слое детали структурные превращения (вторичную закалку) с получением упрочненного (белого) слоя. Таким образом обеспечивается проведение чистовой механообработки со снятием припуска и одновременным упрочнением поверхностного слоя изделия. Такой метод сопровождается значительными удельными давлениями и температурами в зоне обработки, которые определяются, в свою очередь, физико-механическими свойствами инструментального и обрабатываемого материала, геометрическими параметрами инструмента и режимами обработки [3].

Последующее алмазное выглаживание (АВ) широко используется для повышения эксплуатационных свойств деталей машин и приборов. Оно осуществляется скользящим по поверхности детали инструментом с рабочей частью в виде выпуклой криволинейной поверхности. В результате сминания микронеровностей резко снижается шероховатость поверхности и упрочняется поверхностный слой металла. В сравнении с другими видами ППД алмазное выглаживание имеет существенные преимущества, которые обусловлены физико-механическими свойствами алмаза. Этот процесс отличается высокой производительностью и стойкостью инструмента-выглаживателя (индентора) [4-6].

Во время экспериментальных работ проводилось исследование влияния исходной металлической матрицы на шероховатость и упрочнение поверхностного слоя образцов из высокопрочного чугуна в различном структурном состоянии при комплексной механической обработке (лезвийно-упрочняющая обработка с последующим алмазным выглаживанием).

Для экспериментальных исследований использовались цилиндрические образцы из высокопрочного чугуна, применяемого в настоящее время для производства ответственных деталей двигателей внутреннего сгорания (коленчатых и распределительных валов, поршневых колец, шатунов и т.д.), следующего химического состава: 3,5%С, 2,7%Si, 0,7%Mn, 0,03%P, 0,005%S, 0,1%Ni, 0,1%Cr, 0,07%Mg. Чугунные образцы, полученные из одной плавки, затем подвергались различным видам термической обработки.

Рациональные марки инструментальных материалов для лезвийно-упрочняющей механической обработки высокопрочного чугуна выбирались на основании анализа основных физико-механических характеристик инструментальных материалов, а также по результатам экспериментального определения коэффициента трения пары «ВЧШГ – инструментальный материал». Таким образом, в качестве инструментальных материалов были выбраны: твердый сплав Т15К6 и поликристаллический сверхтвердый материал на основе нитрида бора

гексанит-Р (композит 10). Для алмазного выглаживания использовали индентор из АСПК (ТУ2-037-100-78) с радиусом при вершине 1,5 мм.

В процессе экспериментальных работ было определено, что с повышением твердости высокопрочного чугуна уменьшается значение оптимальных отрицательных передних углов инструмента (с точки зрения получения на поверхности качественного сплошного белого слоя при необходимой шероховатости поверхности). При обработке гексанитом-Р оптимальные значения отрицательного переднего угла в среднем на 5° больше ($\gamma = -35^\circ \div -50^\circ$) по сравнению с точением резцами из твердого сплава Т15К6 ($\gamma = -30^\circ \div -45^\circ$), что объясняется несколько большей теплопроводностью и меньшим коэффициентом трения гексанита-Р в паре с ВЧШГ.

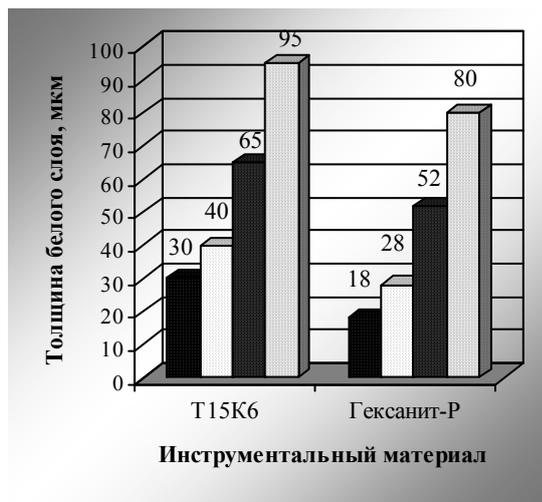


Рис. 1. Толщина упрочненного (белого) слоя после комплексной механической обработки высокопрочного чугуна в различном исходном структурном состоянии.

Поэтому уменьшается и толщина белого слоя (рис. 1,а).

Металлографическими исследованиями установлено, что белый слой на высокопрочном чугуне после лезвийно-упрочняющей обработки представляет собой структуру мартенсита чрезвычайно тонкого строения и остаточного аустенита, который имеет большую микротвердость, чем обычный, за счет того, что является наклепанным.

Структура мартенсита белого слоя характеризуется большей твердостью, чем мартенсит того же чугуна обычной закалки. Под слоем вторичной закалки повышенной твердости для высокопрочного чугуна, имеющего структуру мартенсита или троостит отпуска, находится зона вторичного отпуска пониженной твердости. У образцов из ВЧШГ с сорбитной и перлитно-ферритной матрицей не наблюдается зоны вторичного отпуска. Образование структуры вторичной закалки связано с увеличением удельного объема и, следовательно, возникновением в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений, что улучшает эксплуатационные характеристики деталей машин.

В процессе алмазного выглаживания происходит: снижение шероховатости поверхности (рис.2), некоторое повышение микротвердости поверхностно-

Экспериментальными исследованиями установлено, что с уменьшением температуры отпуска высокопрочного чугуна (табл.1) возрастает толщина упрочненного (белого) слоя при лезвийно-упрочняющей обработке (рис. 1). Это объясняется увеличением силы и температуры резания, а значит, и температуры поверхностного слоя, что активизирует процесс структурных изменений в нем.

В случае обработки резцами из гексанита-Р усилия и температура в зоне резания меньше по сравнению с точением инструментом из Т15К6, что обусловлено различием физико-механических свойств этих инструментальных материалов.

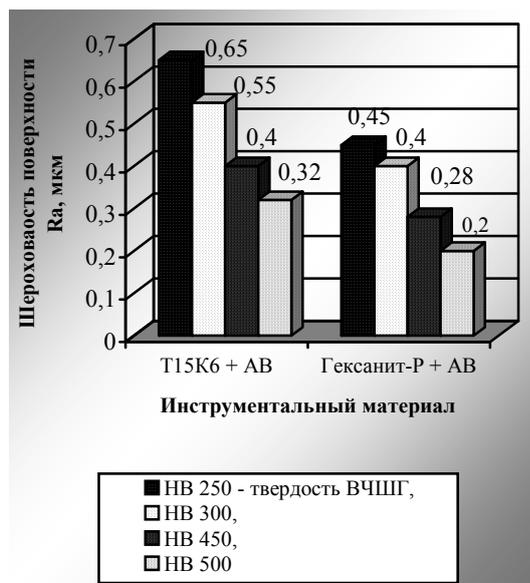


Рис. 2. Величина шероховатости поверхности после комплексной механической обработки высокопрочного чугуна в различном исходном структурном состоянии.

2. Стойкость резцов из гексанита-Р на оптимальных режимах при лезвийно-упрочняющей обработке в среднем в 7 раз выше, чем при обработке твердосплавным инструментом и составляет 90-250 мин и 10-40 мин соответственно.

Литература: 1. Солнцев Л.А., Зайденберг А.М., Малый А.Ф. Получение чугунов повышенной прочности. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1986. – 152 с. 2. Петриченко А.М., Зайденберг А.М. Тенденции производства высокопрочных чугунов // Автомобильная промышленность. – 1988. – № 2. – С. 35-36. 3. Бабей Ю.И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. – Киев: Наукова думка, 1988. – 240 с. 4. Одинцов Л.Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибро-выглаживанием. – М.: Машиностроение, 1981. – 160 с. 5. Торбило В.М. Алмазное выглаживание. – М.: Машиностроение, 1972. – 104 с. 6. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением / Л.А. Хворостухин, С.В. Шишкин, А.П. Ковалев, Р.А. Ишмаков. – М.: Машиностроение, 1988. – 144 с.

УДК 694.67

ВЫБОР МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ КОРРОЗИОННО-АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА

Ковальчук А.Н., канд. техн. наук, **Глушкова Д.Б.**, канд. техн. наук,
Тарабанова В.П., канд. техн. наук, **Нестеренко Е.А.**, **Лахматов С.В.**
 (г. Харьков, Украина)

It is carried out the investigation of three variety of steels. On the basis of the results of experience it is received the recommendation about application of constructional materials for flight conveyer.

Введение. Детали угольных скребковых конвейеров подвергаются ускоренному разрушению, вызванному совместным воздействием на них агрессивных масс угля и пород, высоких динамических нагрузок.

го слоя (за счет превращения части остаточного аустенита в мартенсит), уменьшение неоднородности поверхностного слоя, а также образование в нем остаточных напряжений сжатия. Стойкость алмазных инденторов в зависимости от исходного структурного состояния высокопрочного чугуна составляет 10-20 часов машинного времени.

Выводы.

1. Микротвердость поверхностного слоя после комплексной механической обработки ВЧШГ достигает 5800-8700 МПа при толщине упрочненного слоя 20-100 мкм, шероховатость поверхности составляет $Ra = 0,15-0,8$ мкм (в зависимости от структуры исходной металлической матрицы чугуна и вида инструментального материала).

Ответственным узлом, определяющим работоспособность скребкового конвейера, является сопряжение “звено тяговой цепи – днище”. Зачастую выбор конструкционных материалов, подвергающихся трению в коррозионно-активной среде, основывается главным образом на их стоимости, доступности и далеко не всегда увязан с конструктивной прочностью, структурой и др.

Анализируя условия работы шахтных скребковых конвейеров, следует отметить, что сопряжение “днище-звено тяговой цепи” подвергается весьма сложному процессу изнашивания.

Интенсивность и характер разрушения поверхности трения указанных деталей определяется такими основными факторами: физико-механическими, эксплуатационными свойствами конструкционных материалов деталей сопряжения, его нагрузочно-скоростными параметрами, коррозионной активностью шахтной воды, а также абразивностью угля и породы.

Другими словами, в данном случае природу повреждаемости деталей днища и звена тяговой цепи скребкового конвейера можно характеризовать как специфическую форму механико-коррозионного износа, активизирующегося в значительной мере наличием абразива.

Исходя из этого, необходимо использовать такие конструкционные материалы для деталей скребкового конвейера, которые в наиболее полной мере отвечают требованиям относительно твердости, коррозионной стойкости, стойкости против абразивного износа, как преобладающего вида повреждения.

В связи с тем, что ведущим видом изнашивания деталей скребковых шахтных конвейеров является абразивный износ, то выбор марок сталей для их деталей производится с учетом прежде всего износостойкости.

Как показал опыт отечественного и зарубежного производства шахтного оборудования, чаще всего используются следующие износостойкие стали: 45Г2, 35ХГСА, 25Г2СР, 56Т, 30Г, 15ХСНД, 25ХГСР, сталь ASTM (американский стандарт) и другие. Основным критерием пригодности той или иной марки стали для шахтного оборудования считается твердость.

Чем выше твердость металла, тем он более износостойкий в условиях контактных давлений и действия абразивных частиц.

Для правильного выбора марки стали необходим комплексный подход, который должен учитывать все факторы, прямо или косвенно влияющие на износ- и коррозионную стойкость.

Материал и методика проведения исследований. Материалом для исследования были стали 30Г, 25ХГСР, ASTM (американский стандарт).

Состав абразивно-коррозионной среды варьировали таким образом, чтобы при определенных (оптимальных) нагрузочно – скоростных параметрах обеспечивался нормальный процесс трения, без явных повреждений (задилов), но достаточно интенсивный износ, поскольку реальные условия эксплуатации довольно жесткие.

Сравнительные испытания сталей на износостойкость проводили по схеме “колодка-диск”, воспроизводящей скольжение при наличии воды и абразива.

Были приняты следующие условия лабораторных износных испытаний предлагаемых сталей сопряжения “днище-звено тяговой цепи”: приработка 30

мин., при нагрузке 1,0 кгс (0,1 МПа) с последующим увеличением до 3,0 кгс (0,3 МПа), скорость скольжения – 0,63 м/с. Состав рабочей среды: уголь дисперсностью 400 мкм и ниже – 30г; кварцевый песок дисперсностью 200 мкм и меньше – 10 г; тальк – 5 г; графит серебристый – 0,5 г; вода водопроводная – 60 г. В процессе испытаний вода частично испарялась и для поддержания постоянного уровня и состава рабочей среды в ванночку с помощью 50 мл пипетки подавали каплями воду с различной интенсивностью в зависимости от скорости испарения.

Рабочая среда указанного состава использовалась для всего периода (36 часов) испытания одной пары образцов.

Результаты эксперимента и их обсуждения. Сталь 30Г имеет феррито-перлитную структуру. Твердость составляет 225...230 НВ.

Структура стали 25ХГСП представляет собой тростит и небольшое количество мелких карбидов. Твердость 380...390 НВ.

Структура стали ASTM (американский стандарт) – сорбито-троститная. Твердость 320...330 НВ.

По каждому варианту сопряженных материалов испытывали по четыре пары трения “колодка-диск”. Так как износостойкость материалов сопряжения оценивалась по потере массы (ΔP , г) образцов, то их взвешивание производилось до начала испытания и через каждые 6 часов испытания, что позволило наблюдать динамику процесса изнашивания.

Максимальную износостойкость показывает сталь 25ХГСП. За 36 часов испытаний в паре с контртелом из стали 25ХГНМА при принятом нагрузочно – скоростном режиме износ колодки из стали 25ХГСП составил 0,2439г. Сталь ASTM, и в особенности сталь 30Г, обладают в идентичных условиях трения значительно более низкой износостойкостью, а абсолютная потеря массы изготовленных из них колодок составляет, соответственно, 0,4086 и 0,7022г.

Следует заметить, что износ дисков из закаленной и отпущенной стали 25ХГНМ характеризуется примерно одинаковой величиной (0,16...0,17г) при трении в паре с колодками из стали 30Г и ASTM. Однако в сопряжении со сталью 25ХГСП износ диска примерно в 1,5...2 раза ниже, что позволяет считать это сочетание материалов наиболее благоприятным с точки зрения структурной приспособляемости в условиях коррозионно-абразивного трения.

Практически при любом характере процесса изнашивания металлов и сплавов важной характеристикой является не столько абсолютная величина износа за определенный промежуток времени, сколько кинетика самого процесса. Она оценивается обычно изменением величины относительного износа во времени.

На рисунке приведены кривые, характеризующие тенденцию протекания процесса поверхностного разрушения исследуемых сталей в промежутке времени от начала испытаний до 36 часов работы сопряжения “колодка-диск”.

Функциональная зависимость относительной потери массы образцов за каждые 6 часов испытаний позволяет наблюдать сравнительно быструю стабилизацию процесса изнашивания стали 25ХГСП – сталь 25ХГНМА и аналогичную, но при более высокой скорости потери массы для пары сталь ASTM – сталь 25ХГНМА.

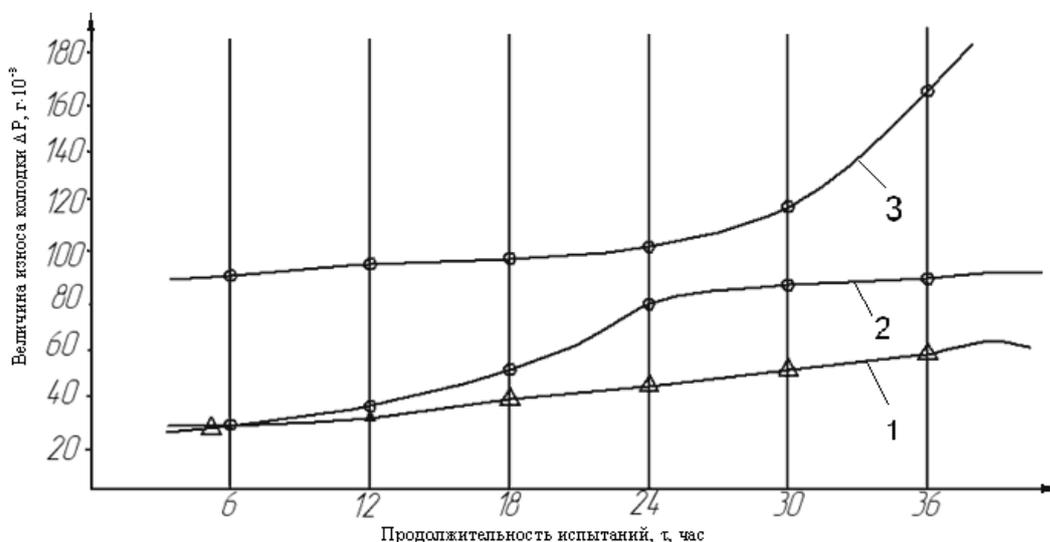


Рис. 1. Изменение величины относительно износа во времени: 1 – сталь 25ХГСП; 2 – сталь ASTM; 3 – сталь 30Г.

Исследования показали, что для стали 30Г за 36 часов испытаний не наблюдается четкая тенденция начала стабилизации процесса изнашивания (кривая 3 на рисунке имеет еще довольно крутой наклон к оси ОХ).

Проведенные на протяжении 120 часов испытания коррозионной стойкости трех исследуемых марок сталей в водной среде при температуре 20°C показали, что максимальную скорость коррозии ($V_k=380 \cdot 10^{-4} \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$) обнаруживает сталь 30Г, минимальную ($V_k=0,75 \cdot 10^{-4} \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-2}$) – сталь 25ХГСП.

Скорость коррозии стали ASTM равняется $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Следует учесть тот факт, что коррозия при трении протекает еще более интенсивно, так как имеет место нагрев образцов в макрообъеме до температуры +60°C.

Полученные результаты коррозионной стойкости исследуемых сталей дают дополнительную информацию о поведении их при трении в коррозионно-активной среде, какой является вода.

Выводы.

1. Анализ условий работы шахтных скребковых конвейеров показал, что многие детали подвергаются сложному абразивно-коррозионному изнашиванию, протекающему под одновременным воздействием динамических нагрузок.
2. Функциональная зависимость относительной потери массы от времени при износных испытаниях свидетельствует о быстрой стабилизации процесса изнашивания стали 25ХГСП. Аналогичная зависимость, но при более высокой скорости потери массы наблюдается у стали ASTM. В стали 30Г за время проведения испытаний не наблюдается тенденция начала стабилизации процесса изнашивания.
3. Наиболее благоприятным сочетанием материалов с точки зрения структурной приспособляемости в условиях коррозионно-абразивного трения отличается сталь 25ХГСП- сталь 25ХГНМ.
4. Сталь 25ХГСП по результатам испытания может быть рекомендованы в качестве конструкционного материала днищ скребковых конвейеров.

Литература: 1. Кольцов В.Е., Стульнина Г.С. и др. Перспективный метод создания

коррозионностойких и износостойких покрытий // Прогрессивные методы получения конструкционных материалов и покрытий, повышающих долговечность деталей машин. – Волгоград, 1998. – С. 58-59. 2. Бойцов А.Г., Машков В.Н. и др. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами. – М.: Машиностроение, 2001. – 143 с.

УДК 621.873

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КРАНА ПУТЕМ УВЕЛИЧЕНИЯ ЕГО СКОРОСТИ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ С ОДНОВРЕМЕННЫМ УСТРАНЕНИЕМ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА И ТОЧНЫМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕМ

Свиргун В.П., канд. техн. наук, Свиргун О.А., канд. техн. наук
(г. Харьков, Украина)

In work the way of increase of productivity of the crane is considered. It is offered to take off restrictions on speed of the crane at preservation of restriction on driving effort.

Одним из существенных препятствий для повышения производительности крана является наличие гибкого подвеса груза, вследствие чего попытки интенсифицировать процесс перегрузки приводит к значительным колебаниям груза и трудностям подвода груза на цель. В конечном итоге производительность крана не повышается, а падает. По сути, невысокая скорость передвижения крана (около 1,2 м/с) обусловлена, в основном, желанием ограничить амплитуду раскачки груза, тогда как, очевидно, что для повышения производительности крана не избежать увеличения скоростей и ускорений механизмов крана.

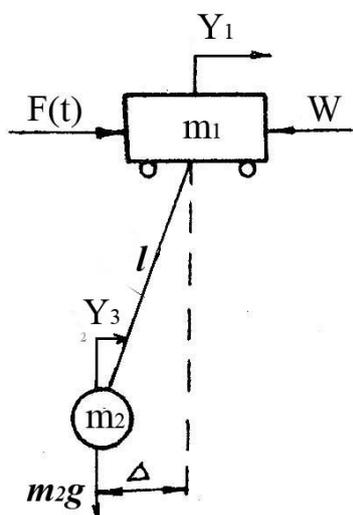


Рис.1. Схема двухмассовой модели крана.

В данной работе делается попытка совместить два, на первый взгляд, антагонистических подхода - использовать максимально допустимые скорость и ускорение передвижения точки подвеса груза и полное устранение раскачки груза в заданном месте остановки.

Ранее были проведены исследования оптимальных по быстрдействию законов управления краном при ограничении скорости его передвижения [1,2].

Задача решена для двухмассовой модели крана, состоящей из тележки массой m_1 и груза массой m_2 , подвешенного на канате длиной l . На тележку действует движущее усилие $F(t)$ и усилие статического сопротивления W .

Движение исследуемой модели описывается системой уравнений

$$Y_1 = b_1 + b_2 t - b_3 \frac{m_2}{m_1} \cos \lambda t - b_4 \frac{m_2}{m_1} \sin \lambda t + \frac{u_0}{\lambda} \left[\frac{gt^2}{2l} + \left(1 - \frac{g}{l\lambda^2} \right) (1 - \cos \lambda t) \right];$$

$$Y_2 = b_2 + b_3 \lambda \frac{m_2}{m_1} \sin \lambda t - b_4 \frac{m_2}{m_1} \cos \lambda t + \frac{u_0}{\lambda^2} \left[\frac{gt}{l\lambda} + \left(1 - \frac{g}{l\lambda^2}\right) \sin \lambda t \right]; \quad (1)$$

$$Y_3 = b_1 + b_2 t - b_3 \cos \lambda t - b_4 \sin \lambda t + \frac{gu_0}{\lambda^2} \left[\frac{t^2}{2} - \frac{1}{\lambda^2} (1 - \cos \lambda t) \right];$$

$$Y_4 = b_2 - b_3 \lambda \sin \lambda t + b_4 \lambda \cos \lambda t + \frac{gu_0}{l\lambda^2} \left[t - \left(\frac{\sin \lambda t}{\lambda} \right) \right],$$

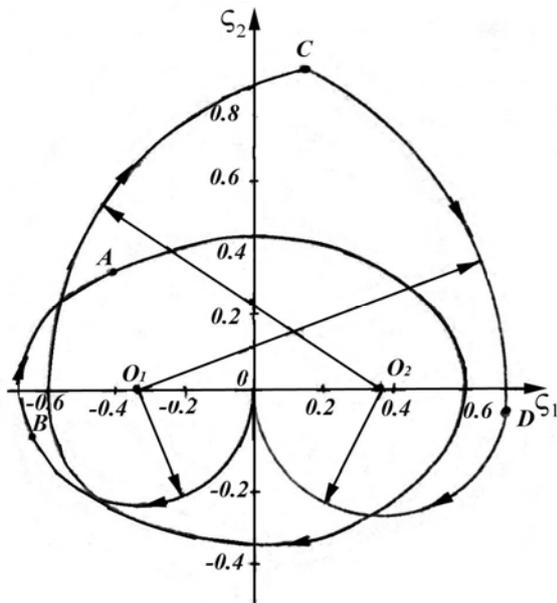


Рис. 2. Фазовая диаграмма.

где Y_1 – перемещение тележки; Y_2 – скорость тележки; Y_3 – перемещение груза; Y_4 – скорость груза.

Удобно движение такой модели рассматривать на фазовой плоскости в системе координат (ξ_1, ξ_2) , где $\xi_1 = (Y_3 - Y_1)\lambda$; $\xi_2 = (Y_4 - Y_2)$. На ней весь процесс движения представляется в виде дуг окружностей (на переходных процессах) или эллипсов (на установившемся движении).

В результате применения разработанного алгоритма получены графики переходных процессов, реализация которых позволит переместить груз в заданную точку за кратчайшее время (при заданных ограничениях) с гашением колебания груза.

нием колебания груза.

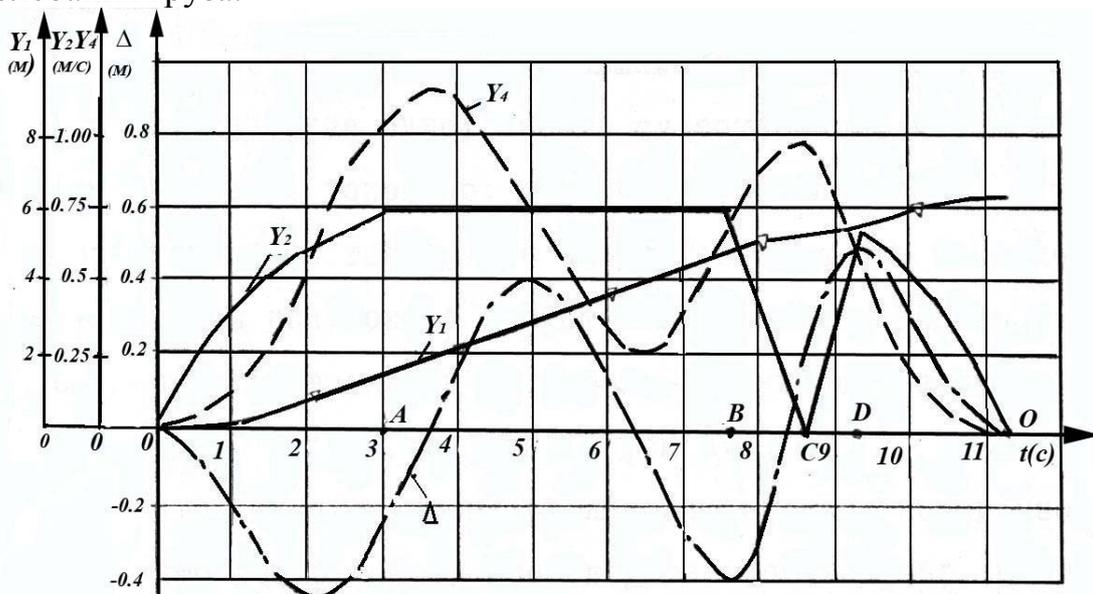


Рис. 3. Графики переходных процессов.

Поскольку проблема раскачки груза в заданной точке при ограничении скорости передвижения крана решена, то будет оправдано решить аналогичную задачу без ограничения скорости передвижения крана. Очевидно, что успешное

решение задачи в такой постановке приведет к сокращению времени перегрузочного цикла, а, следовательно, позволит повысить производительность крана.

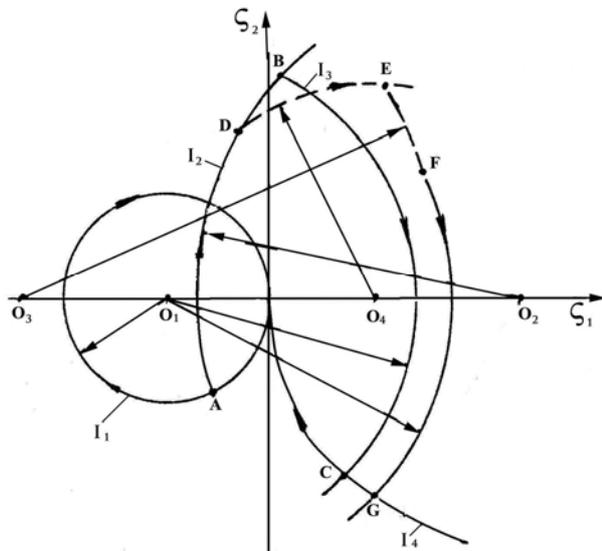


Рис. 4. Фазовая диаграмма.

Уже на этой стадии исследования можно определенно сказать о величине максимального отклонения груза от вертикали Δ_{max} при разгоне тележки, если к ней приложено постоянное движущее усилие. Как видно из рисунка 4

$$\Delta_{max} \leq 2 \frac{K - W}{m_1 \lambda^2}.$$

Итак, сформулированная оптимизационная задача сводится к попаданию кратчайшим путем из любой точки окружности в начало координат так, чтобы в этой точке выполнялись условия $Y_1 = S$ и $Y_2 = 0$.

Очевидно, что длительность первого этапа определяется из условия $Y_1 = S$ в конце движения. Поэтому, алгоритм поиска оптимального решения должен быть общим для всех точек окружности I_1 .

Предположим, что торможение тележки начинается в точке А. Дальнейшее движение будет происходить по окружности торможения I_2 с центром в

точке $O_2 \left(\frac{N + W}{m_1 \lambda}, 0 \right)$, но по этой траектории, как видно из рис.4, нельзя попасть

в точку O . Единственной траекторией торможения, проходящей через эту точку является окружность I_4 центром O_2 . Поскольку окружности I_2 и I_4 не имеют общих точек, т.к. являются концентрическими, то переход с одной окружности на другую возможен по траектории разгона типа I_3 . Таким образом, доказывается обязательное наличие этапа разгона на стадии торможения тележки. Из множества траекторий типа I_3 следует выбрать такую, чтобы в точке O выполнялось условие $Y_2 = 0$. Фактически, из этого условия определяется длительность второго этапа, зная которую можно однозначно определить длительности двух последних этапов $t_{вс}$ и $t_{со}$, используя формулу

$$t_i = \varphi_i / \lambda. \quad (2)$$

Для этого необходимо определить координаты точки $C(\zeta_{1C}, \zeta_{2C})$, что не-

Рассмотрим процесс движения исследуемой модели на фазовой плоскости (ζ_1, ζ_2) . Движение начинается из состояния покоя $Y_{10} = Y_{20} = Y_{30} = Y_{40} = 0$, которому на фазовой плоскости соответствует начало координат. Можно однозначно установить траекторию первого этапа перегрузочного цикла, т.к. известны начальные фазовые координаты - это окружность I_1 (рис. 4.) с центром $O_1 \left(-\frac{K - W}{m_1 \lambda}, 0 \right)$, проходящая через начало координат и соответствующая разгону тележки.

трудно сделать, т.к. известны координаты точки B (ζ_{1B} , ζ_{2B}) и радиус окружности I_4 . В результате получим

$$t_{BC} = \frac{1}{\lambda} \left(\operatorname{arctg} \frac{\xi_{2B}}{u_0/\lambda + \xi_{1B}} + \operatorname{arctg} \frac{\xi_{2C}}{u_0/\lambda + \xi_{1C}} \right), \quad (3)$$

$$t_{CO} = \frac{1}{\lambda} \operatorname{arccos} \left(1 - \frac{\lambda \xi_{1C}}{u_0} \right). \quad (4)$$

Рассмотрим частный случай, когда на участке AB скорость тележки достигнет нуля, например в точке D , и среди точек дуги AD не найдено такой, чтобы выполнялось условие $Y_1=S$. Дальнейшее движение будет происходить в обратном направлении, но известно, что при изменении знака скорости тележки усилие статического сопротивления также меняет направление. На фазовой плоскости это отражается так, что дуга AB в точке D претерпевает излом и в

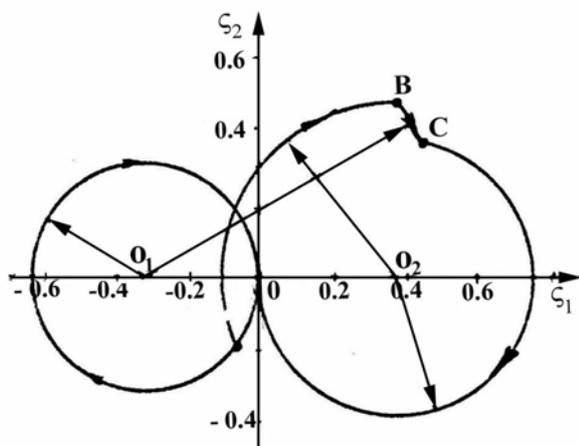
дальнейшем движение будет происходить по дуге DE с центром $O_4 \left(\frac{N-W}{m_1 \lambda}, 0 \right)$

соответствующей разгону тележки в обратном направлении, и дуге EF с центром точке $O_3 \left(-\frac{K+W}{m_1 \lambda}, 0 \right)$ соответствующей торможению тележки до нулевой скорости при обратном движении. Таким образом, в рассмотренном частном случае оптимальное решение следует искать среди траекторий типа $OADEPGO$,

а длительности этапов определяются следующим образом: этапы AD и EF определяются путем решения трансцендентного уравнения $Y_2 = 0$, используя выражение для Y_2 из (1); этап DE - из условия $Y_2=0$, а этапы FG и GO по формуле (2). Здесь и в дальнейшем аналитические выражения для определения длительности этапов, полученных с помощью формулы (2) не приводятся из-за их громоздкости.

Рассмотренный частный случай, как показывают многочисленные расчеты, часто возникает при больших длинах подвеса (свыше 20 м), когда в течение достаточно длительных промежутков времени на движение тележки не оказывает существенного влияния колеблющийся груз и скорость тележки может изменяться в широком диапазоне, включая и область отрицательных значений.

Рис. 5. Фазовая диаграмма.



На рис. 5 и рис. 6 показаны фазовая диаграмма и графики переходных процессов, полученные в результате решения поставленной оптимизационной задачи по описанной методике.

Для расчета взяты параметры тележки мостового грейферного крана: $m_1 = 3610$ кг; $m_2 = 2650$ кг; $K = 2400$ Н; $N = 1450$ Н; $W = 570$ Н; $l = 7,5$ м; $S = 6,2$ м.

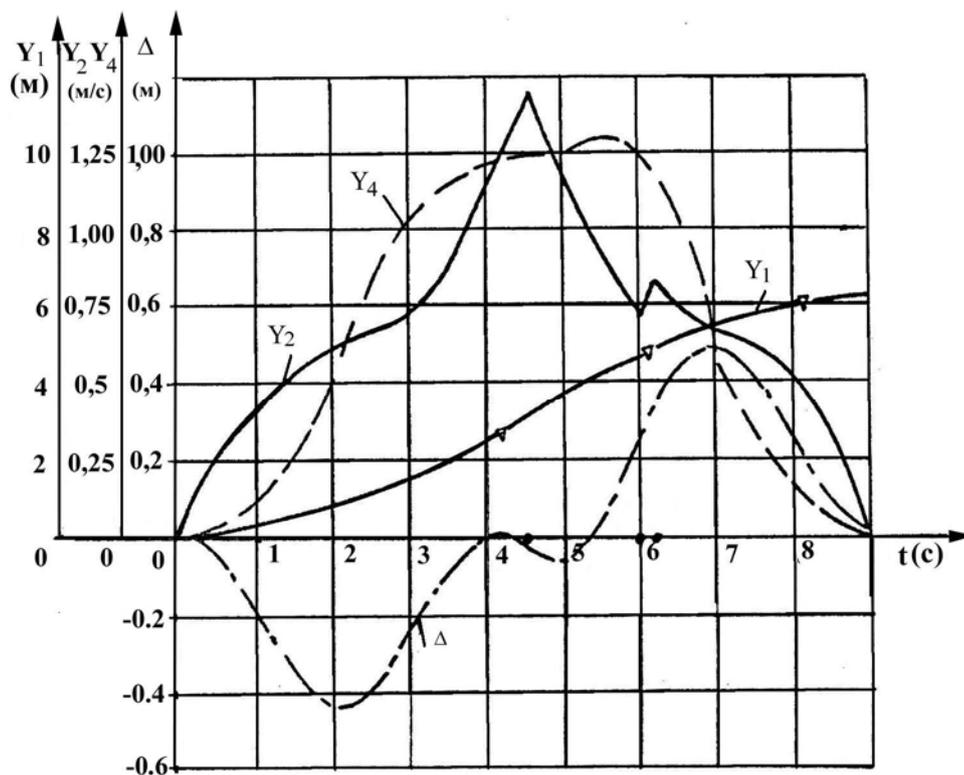


Рис. 6. Графики переходных процессов.

Полученные графики переходных процессов дадут ожидаемый эффект, если их реализовывать на кране с помощью микропроцессорной техники и перейти в автоматический режим управления. Дальнейшая модернизация системы в направлении совмещения движений, автоматического захвата груза позволит в будущем создать кран-робот, развивающий наивысшую производительность.

Литература: 1. Григоров О.В., Свиргун В.П. Синтез оптимальных по быстродействию законов управления движением грузовой тележки крана мостового типа // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №11. – С. 98-102. 2. Григоров О.В., Свиргун В.П. Повышение производительности технологических кранов путем оптимального управления движением // Машиноведение. – 1986. – №6. – С. 32-36.

УДК 621.833.031

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ВИКИДІВ ПРИ ВИРІШЕННІ ЗАВДАНЬ НАДІЙНОСТІ ПРИ РІЗНИХ МОДЕЛЯХ ВІДМОВ

Приймаков О.Г., канд. техн. наук, **Градиський Ю.О.**, канд. техн. наук,
Приймаков Г.О., аспірант (м. Харків, Україна)

Possibility of the application of emissions theory for determination of probability of faultless work and reliability at the different physical patterns of failures has been considered.

Підвищення надійності машин і механізмів – найважливіша науково-технічна проблема вітчизняного машинобудування. В роботах [1, 2, 3] показано, що інтегральна надійність може бути представлена у вигляді вектора $Z(t)$ в деякій області працездатних станів Ω .

Розглянемо вирішення основного завдання надійності – визначення імові-

рності безвідмовної роботи (ІБР) в часі $P(t)$ для найбільш характерних для машинобудування фізичних моделей відмов.

1. Вібраційні відмови в результаті недостатньої твердості конструкції. Для відмов даного типу як параметри вектора $Z(t)$ вибираються переміщення певних точок конструкції. Границі області працездатних станів Ω визначаються гранично припустимими значеннями вібраційних переміщень. Розглянемо кілька прикладів, що ілюструють застосування теорії викидів для вирішення завдань надійності об'єктів, в яких виникають вібраційні відмови в результаті їх недостатньої твердості.

Як приклад візьмемо шарнірно обперту статично визначену балку при довільних умовах навантаження.

Математичне очікування зовнішнього навантаження дорівнює нулю. Нехай система перебуває в працездатному стані, якщо позитивні переміщення балки не будуть перевищувати гранично припустимих значень Γ .

Як компоненти вектора $Z(t)$ виберемо переміщення в дев'яти перетинах балки

$$Z_i(t) = Y_i\left(t, \xi_i = \frac{il}{10}\right), \quad i = \overline{1,9}.$$

Область працездатних станів визначається дев'ятьма нерівностями

$$\Omega: Z_i(t) = Y_i\left(t, \xi_i = \frac{il}{10}\right) \langle \Gamma, \quad i = \overline{1,9}.$$

ІБР визначиться як імовірність випадкової події:

$$P(t) - P\left[Z_i(\tau) = Y_i\left(\tau, \xi_i = \frac{il}{10}\right) \langle \Gamma, \quad i = \overline{1,9}; 0 \leq \tau \leq t\right]. \quad (1)$$

Переміщення $B(t, \xi)$ для розглянутого випадку навантаження і малому затуханні в системі можна розглядати як суперпозицію двох вузькосмугових випадкових процесів з несучими частотами ω_1 і ω_2 , що відповідають першим двом власним частотам коливань:

$$Y(t, \xi) = Y_1(t, \xi) + Y_2(t, \xi). \quad (2)$$

Згідно [2] дисперсія переміщень балки

$$D_y = \sum_{j=1}^2 \sin \frac{j\pi\xi}{l} \frac{C_j S_0}{\rho F 4 \varepsilon_j \omega_j^2} = \sum_{j=1}^2 D_{y_j}, \quad (3)$$

де D_{y_j} - дисперсії складових $Y_j(t, \xi)$, які передбачаються статистично незалежними.

Для визначення дисперсії швидкості переміщень продиференціюємо (2) за часом

$$\dot{Y}(t, \xi) = \dot{Y}_1(t, \xi) + \dot{Y}_2(t, \xi).$$

Піднесемо до квадрата отриманий вираз і проведемо його осереднення з врахуванням статистичної незалежності \dot{Y}_1 і \dot{Y}_2 . В результаті одержимо

$$D_{\dot{y}} = M\left[\dot{Y}_1^2 + 2\dot{Y}_1\dot{Y}_2 + \dot{Y}_2^2\right] = D_{\dot{y}_1} + D_{\dot{y}_2}. \quad (4)$$

З огляду на, що $Y_j(t, \xi)$ є вузькосмуговими процесами, дисперсії похідних

можна виразити через дисперсії процесів:

$$D\dot{y}_j = \omega_j D_{y_j}. \quad (5)$$

Із співвідношень (3) - (5) слідує вираз для дисперсії швидкості переміщень балки

$$D_{\dot{y}}(\xi) = \sum_{j=1}^2 \omega_j D_{y_j} = \sum_{j=1}^2 \sin \frac{j\pi\xi}{l} \frac{C_j S_0}{\rho F 4 \varepsilon_j \omega_j}. \quad (6)$$

Згідно (1) ІБР за умови високої надійності об'єкта, визначаємо згідно [3], де $n = 9$; $m_{zi} = 0$; $r_i = -\infty$; $\Gamma_i = \Gamma$:

$$D_{Z_i}(\xi_i) = \sum_{j=1}^2 \sin \frac{j\pi i}{10} \frac{C_j S_0}{\rho F 4 \varepsilon_j \omega_j^2}; \quad D_{\dot{Z}_i}(\xi_i) = \sum_{j=1}^2 \sin \frac{j\pi i}{10} \frac{C_j S_0}{\rho F 4 \varepsilon_j \omega_j};$$

$$\omega_{ei} = \sqrt{\frac{D_{\dot{Z}_i}}{D_{Z_i}}} \quad (i = \overline{1,9}). \quad (7)$$

З врахуванням зазначених умов, підставляючи (7) у відому формулу [1, 2] для $P(t)$

$$P(t) \approx 1 - \frac{t}{2\pi} \sum_{i=1}^9 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^2 \sin \frac{j\pi i}{10} \frac{C_j S_0}{\varepsilon_j \omega_j}}{\sum_{j=1}^2 \sin \frac{j\pi i}{10} \frac{C_j S_0}{4\omega_j^2 \varepsilon_j}}} \exp \left[-\frac{2\Gamma^2 \rho F}{\sum_{j=1}^2 \sin \frac{j\pi i}{10} \frac{C_j S_0}{\varepsilon_j \omega_j^2}} \right]. \quad (8)$$

2. Відмови в результаті порушення статичної міцності. Розглянемо випадок, коли конструкція перебуває під дією випадкових навантажень, що викликають високий рівень напруг і приводять до руйнування в результаті недостатньої міцності при однократному навантаженні. В цьому випадку проблеми, пов'язані з накопиченням пошкоджень, не виникають.

1-й випадок. Крихке руйнування, поява неприпустимих деформацій пластичності та повзучості. Використовуючи традиційні методи розрахунку статичної міцності по номінальним допустимим напругам, умова безвідмовної роботи елементів конструкцій

$$\sigma_E \langle [\sigma], \quad (9)$$

де $[\sigma]$ - допустимі номінальні напруження, які визначаються по призначуваних запасах міцності $n_B, n_T, n_{B\tau}$ і межах:

а) міцності σ_B для крихких матеріалів $[\sigma] = \frac{\sigma_B}{n_B}$ при порушенні статичної міцності;

б) плинності σ_T для пластичного матеріалу $[\sigma] = \frac{\sigma_T}{n_T}$ при неприпустимості появи залишкових деформацій;

в) тривалої міцності $\sigma_{B\tau}^T$ для часу τ і певній температурі T : $[\sigma] = \frac{\sigma_{B\tau}^T}{n_{B\tau}}$ при

порушенні тривалої міцності внаслідок повзучості.

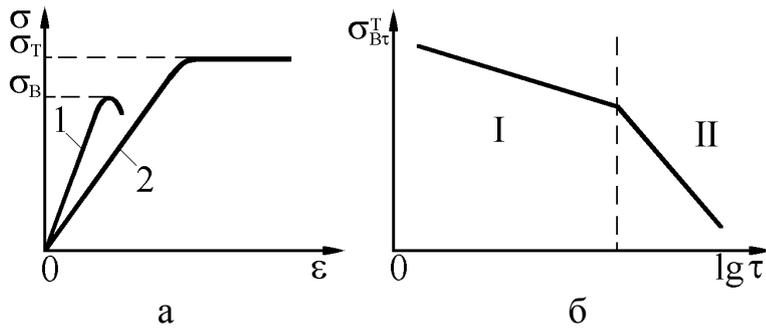


Рис. 1. Діаграми деформування (а) та крива тривалої міцності (б).

На рис. 1 показані: *a* - діаграми деформування крихкого (1) і пластичного (2) матеріалів; *б* - крива тривалої міцності при певній температурі T [1], де I - в'язке руйнування, II - крихке руйнування; σ_E - максимальні номінальні еквівалентні напруги в певних точках конструкції, які знайде-

мо з використанням класичних теорій міцності для складного напруженого стану в припущенні пружного деформування для випадків *a* і *б* і виникнення деформацій повзучості для випадку *в*.

Якщо для елементів конструкцій поза зонами концентрації реалізується складний напружений стан з компонентами головних напруг $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, то найбільш часто використовуються наступні теорії міцності [4]: найбільших нормальних напруг

$$\sigma_E = \sigma_1; \quad (10)$$

найбільших лінійних деформацій

$$\sigma_E = \sigma_1 - \mu (\sigma_2 + \sigma_3); \quad (11)$$

μ - коефіцієнт Пуассона;

найбільших дотичних напружень

$$\sigma_E = \sigma_1 - \sigma_3. \quad (12)$$

В співвідношеннях (9) – (12) σ_E береться в найнебезпечнішій точці конструкції, де воно досягає максимального значення.

Для розглянутих моделей відмов в результаті крихкого руйнування, неприпустимість появи залишкових деформацій в пластичних матеріалах і порушенні тривалої міцності вектор $Z(t)$ буде одномірним і дорівнює $\sigma_E(t)$

$$Z(t) = \sigma_E(t). \quad (13)$$

Область працездатних станів Ω в припущенні $\sigma_E(t) \geq 0$ буде визначатися по (9)

$$\Omega: Z(t) = \sigma_E(t) \langle \Gamma = [\sigma]. \quad (14)$$

ІБР знаходимо як імовірність випадкової події

$$P(t) = P[Z(\tau) = \sigma_E(\tau) \langle \Gamma = [\sigma], \quad 0 \leq \tau \leq t]. \quad (15)$$

Розглянемо приклади, що ілюструють вирішення завдань надійності для даної моделі відмови.

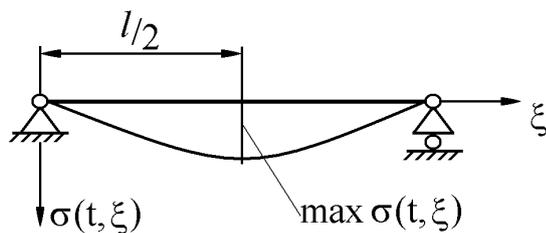


Рис. 2. Епюра нормальних напруг.

Як приклад для даної моделі відмови розглянемо шарнірно обперту статично визначену балку при довільному зовнішньому навантаженні.

Математичне очікування зовнішнього навантаження дорівнює нулю. Відмо-

ви виникають в результаті крихкого руйнування. Нормальні напруги $\sigma(t)$ значно перевищують дотичні $\tau(t)$. Коефіцієнт C_2 дорівнює нулю.

Вирішення завдання статистичної динаміки для даного випадку наведено в [1, 2]. Нормальні напруги розраховуємо за умови $C_2 = 0$

$$\sigma(t, \xi) = \frac{EI\alpha_1(t)\pi^2}{Wl^2} \sin \frac{\pi\xi}{l}. \quad (16)$$

Епюра $\sigma(t, \xi)$ показана на рис. 2.

Визначаємо вектор

$$Z(t) = \max \sigma(t, \xi) = \frac{EI\pi^2}{Wl^2} \alpha_1(t) \quad (17)$$

і область працездатних станів

$$\Omega: Z(t) = \frac{EI\pi^2}{Wl^2} \alpha_1(t) \langle \Gamma = \frac{\sigma_B}{n_B}. \quad (18)$$

Згідно (15) ІБР знаходимо по відомій формулі [1] в якій обчислюємо при $C_2 = 0$ і $\xi = \frac{l}{2}$, $\omega_e = \omega_1$ - перша власна частота коливань

$$P(t) \approx 1 - \frac{t\omega_1}{2\pi} \exp\left[-\frac{\sigma_B^2}{2n_B^2 D_Z}\right], \quad D_Z = \frac{EI\pi^2 C_1 S_0}{4Wl^2 \rho F \varepsilon_1 \omega_1^2}. \quad (19)$$

Розглянемо ще один приклад для даної фізичної моделі відмови.

Консольна балка прямокутного перетину, навантажена зосередженою квазістатичною силою $X(t) \geq 0$, що представляє стаціонарний нормальний випадковий процес із відомими математичним очікуванням m_X , дисперсіями самого процесу D_X і його похідній $D_{\dot{X}}$ (рис. 3). Відмови виникають в результаті крихкого руйнування.

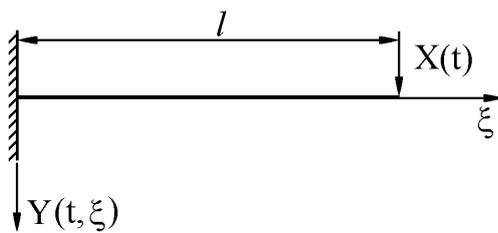


Рис. 3. Консольна балка навантажена силою $X(t)$.

кого руйнування.

При квазістатичному (статичному) прикладенні навантаження завдання статистичної динаміки вирішується як для вироджених систем. Коефіцієнти пропорційності (δ_1 і δ_2) між максимальними, нормальними, дотичними напругами і зовнішнім навантаженням знаходимо по формулах опору матеріалів:

$$\max \sigma(t, \xi) = \delta_1 X(t), \quad \delta_1 = \frac{l}{W}, \quad (20)$$

$$\max \tau(t) = \delta_2 X(t), \quad \delta_2 = \frac{3}{2} F, \quad (21)$$

де W - момент опору перетину балки відносно нейтральної лінії; F - площа поперечного перерізу.

Максимальні еквівалентні напруги, що виникають в закріпленні $\xi = 0$, визначаємо по теорії максимальних дотичних напруг, що у випадку плоского напруженого стану запишемо у вигляді

$$\sigma_E(t) = \sqrt{\sigma^2(t, \xi = 0) + 4\tau^2(t)}. \quad (22)$$

Підставляючи (20) і (21) в (22), одержуємо

$$\sigma_E(t) = X(t)\sqrt{\delta_1^2 + 4\delta_2^2} = X(t)\delta, \quad \delta = \sqrt{\delta_1^2 + 4\delta_2^2}. \quad (23)$$

Визначаємо вектор

$$Z(t) = \max \sigma_E(t, \xi) = \sigma_E(t, 0) = \delta X(t) \quad (24)$$

і область працездатних станів

$$\Omega: Z(t) = \delta X(t) \langle \Gamma = \frac{\sigma_B}{n_B}. \quad (25)$$

ІБР як імовірність випадкової події

$$P(t) = P \left[Z(\tau) = \delta X(\tau) \langle \Gamma = \frac{\sigma_B}{n_B}, \quad 0 \leq \tau \leq t \right]. \quad (26)$$

Її можна обчислити по формулі [1], в якій математичне очікування m_Z і дисперсії D_Z і $D_{\dot{Z}}$ знаходимо відповідно з (3) і (19)

$$P(t) \approx 1 - \frac{t}{2\pi} \sqrt{\frac{\delta^2 D_{\dot{X}}}{\delta^2 D_X}} \exp \left[-\frac{\left(\frac{\sigma_B}{n_B} - \delta m_X \right)^2}{2\delta^2 D_X} \right] = 1 - \frac{t}{2\pi} \sqrt{\frac{D_{\dot{X}}}{D_X}} \exp \left[-\frac{\left(\frac{\sigma_B}{n_B} - \delta m_X \right)^2}{2\delta^2 D_X} \right]. \quad (27)$$

2-й випадок. Квазістатичне або в'язке руйнування. В елементах конструкцій, виготовлених із пластичних матеріалів, під дією навантажень виникають локальні, або загальні пластичні деформації. Зміна номінальних напруг відбувається не пропорційно зміні навантажень внаслідок перерозподілу напруг через виникаючі пластичні деформації, які необхідно враховувати в розрахунку. На рис. 4 показані діаграми деформування для матеріалів: а - ідеально твердопластичного; б - ідеально пружного-пластичного; в - зміцнюючого.

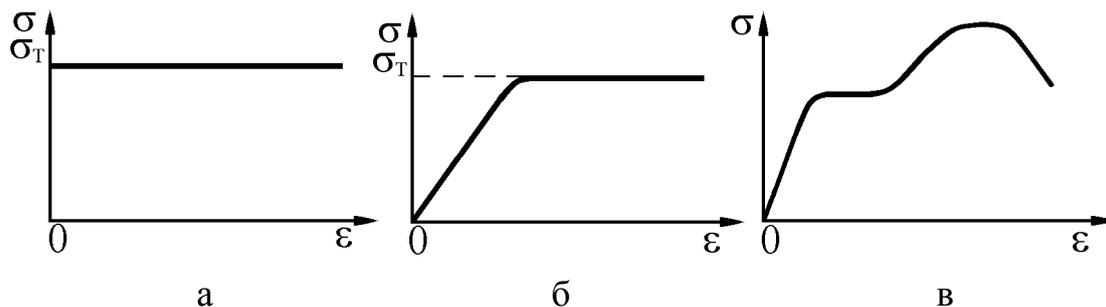


Рис. 4. Діаграми деформування різних матеріалів.

Для матеріалів, діаграма деформування яких найбільше відповідає моделі ідеально твердо-пластичним середовищам, критерій міцності можна сформулювати на основі так званого критерію по допустимим (граничним) навантаженням. Відповідно до цього критерію діючі статичні (квазістатичні) навантаження X не повинні перевищувати допустимих

$$X < [X], \quad (28)$$

де $[X] = \frac{X_{II}}{n_X}$; X_{II} - граничне навантаження, що відповідає перетворенню конс-

трукції в якомусь перетині в механізм за рахунок необмеженого росту пластичних деформацій (при фіксованому X_{II}); n_X - коефіцієнт запасу по граничному навантаженню.

Для прийнятої моделі деформування рівень напруг є максимальним, тобто граничним ($\sigma = \sigma_T$). Навантаження, що приводять конструкцію в рухомий механізм, значно перевищують ті, які відповідають появі перших пластичних деформацій і викликають в якійсь точці граничні напруги. При визначенні граничних навантажень використовується теорія пластичності [1, 5].

Виходячи із зазначених умов міцності для ідеально твердо-пластичних матеріалів сформулюємо завдання прогнозування надійності конструкцій для таких матеріалів. Припустимо, що на конструкцію діють квазістатичні навантаження

$$X(t, \xi) = X_1(t)X_2(\xi), \quad (29)$$

де $X_1(t)$ - випадкова квазістатична функція з відомими імовірнісними характеристиками; $X_2(t)$ - детермінована функція просторових координат.

Допустиме навантаження

$$[X] = \Gamma X_2(\xi). \quad (30)$$

Використовуючи умову працездатності (28) і позначення (29), визначаємо вектор

$$Z(t) = X_1(t) \quad (31)$$

і область працездатних станів

$$\Omega : Z(t) = X_1(t) \langle \Gamma. \quad (32)$$

При врахуванні зміцнення в матеріалі з діаграмою, зображеної на рис. 4, в, міцність конструкцій оцінюють за критерієм стійкості процесу пластичного плину. Суть цього критерію, що формулюється в теорії пластичності, полягає в тому, що визначається гранична деформація ε_{II} залежно від напруженого стану в конструкції та властивостей матеріалу. В цьому випадку умова міцності має вигляд

$$\varepsilon < [\varepsilon], \quad (33)$$

де $[\varepsilon] = \frac{\varepsilon_{II}}{n_\varepsilon}$ - допустима деформація; n_ε - коефіцієнт запасу по граничній деформації.

У випадку квазістатичного навантаження вектор

$$Z(t) = \varepsilon(t), \quad (34)$$

де $\varepsilon(t)$ – максимальна деформація в певній точці конструкції.

Область працездатних станів

$$\Omega : Z(t) = \varepsilon(t) \langle \Gamma = [\varepsilon]. \quad (35)$$

ІБР при квазікрихкому або в'язкому руйнуванні (2-й випадок) визначається виходячи зі співвідношень (32) і (35) як імовірність випадкової події:

$$P(t) = P \left[Z(\tau) = \left\{ \begin{matrix} X_1(\tau) \\ \varepsilon(\tau) \end{matrix} \right\} \langle \left\{ \begin{matrix} \Gamma \\ [\varepsilon] \end{matrix} \right\}; \quad 0 \leq \tau \leq t \right]. \quad (36)$$

3. Відмови в результаті втрати стійкості. Багато елементів конструкцій втрачають свою стійкість, якщо діючи квазістатичні навантаження перевищують критичні. Небезпека втрати стійкості особливо велика для легких тонкостінних конструкцій типу гнучких стрижнів, пластинок і оболонок. Як приклад

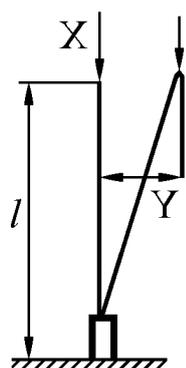


Рис. 5. Прямий пружний стрижень із закріпленням кінцем.

розглянемо центральний стиск квазістатичною випадковою силою X спочатку прямого пружного стрижня із закріпленням кінцем (рис. 5). Це завдання відоме як завдання Ейлера.

При критичному значенні стискаючої сили $X_{KP} = \frac{\pi^2 EI}{(2l)^2}$

прямолінійна форма стає нестійкою і після малих збуджень стрижень набуває нову (стійку) форму рівноваги, якій відповідає вигнута вісь.

Для розглянутої моделі відмови як вектор $Z(t)$ можна вибрати стискаючу силу

$$Z(t) = X(t). \quad (37)$$

Область працездатних станів визначиться нерівністю

$$\Omega : Z(t) = X(t) \langle \Gamma = X_{KP}, \quad (38)$$

а ІБР - як імовірність випадкової події

$$P(t) = P[Z(\tau) = X(\tau) \langle \Gamma = X_{KP}, \quad 0 \leq \tau \leq t]. \quad (39)$$

Висновки по роботі. 1. Теорія викидів дозволяє визначити ІБР при різних фізичних моделях відмов, а саме: вібраційні відмови в результаті недостатньої твердості конструкції, відмови в результаті порушення статичної міцності (крихке і в'язке руйнування), відмови в результаті втрати стійкості. 2. Доведено на конкретних прикладах, що надійність конструкції може бути представлена у вигляді вектора $Z(t)$ в деякій області працездатних станів Ω .

Література: 1. Жовдак В.А. Прогнозирование ресурса, прочности и надежности элементов машиностроительных конструкций: Учебное пособие. – Харьков: изд. НТУ “ХПИ”, 1989. – 95 с. 2. Приймаков О.Г. Системне прогнозування працездатності несучих елементів авіаційних конструкцій. – Автореферат дис. ... докт. техн. наук. – Харків: вид. ППМаш ім. А.М. Підгорного, 2007. – 36 с. 3. Приймаков О.Г., Градиський Ю.О. Теорія зносостійкої витривалості та її застосування в машинобудуванні. – Харків: Оберіг, 2009. – 336 с. 4. Приймаков О.Г., Градиський Ю.О. Витривалість конструкційних матеріалів при абразивному зношуванні. – Харків: Оберіг, 2009. – 383 с. 5. Жовдак В.А., Мищенко И.В. Прогнозирование надежности элементов конструкций с учетом технологических и эксплуатационных факторов. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 1999. – 119 с.

УДК 621.833.031

РАЦИОНАЛЬНОЕ ВИКОРИСТАННЯ ФРИКЦІЙНИХ І МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ В ПАРАХ НЕСТАЦІОНАРНОГО ТЕРТЯ

Приймаков О.Г., канд. техн. наук, Градиський Ю.О., канд. техн. наук
(м. Харків, Україна)

The basic criterion both wear process and jamming and also temperatures of formation and destruction of lubricating films is activation energy of corresponding processes. The estimation of activation energy is carried out on temperature dependences of friction coefficient, which received at test of lubricants on laboratory installations.

В сучасному машинобудуванні робочі органи, типові складальні одиниці приводів і трансмісій багатьох машин і механізмів експлуатуються на нестационарних режимах. Матеріали контактуючих на цих режимах деталей працюють в умовах змінного напруженого стану, обумовленого термічною нестабільністю

фрикційного контакту і нерівномірною шорсткістю. Підвищені градієнти температур, коефіцієнти концентрації напруг і наявність мащення на контакті впливають на тертя, зносостійкість і, отже, на коефіцієнт корисної дії та довговічність конструкції [1-3].

Для виявлення якісних і кількісних залежностей вихідних характеристик від матеріалів пар тертя і експлуатаційних умов розроблені фізичні моделі процесів зношування відповідно до деяких типових триботехнічних завдань (герметології, абразивного зношування, граничного тертя і т.п.). При цьому використовуються системний підхід, методи теорії подоби і розмірності, досягнення науки про тертя, зношування та змащення.

Велика увага приділена вивченню на малогабаритних зразках із застосуванням фізичного моделювання процесів тертя та зношування. На базі системного підходу створена загальна методологія фізичного моделювання, побудовані аналітичні і фізичні моделі перехідних процесів при граничному змащенні, абразивному зношуванні.

В першому наближенні процес утворення металевих зв'язків може бути описаний кінетичним рівнянням першого порядку [4-6]

$$\frac{dx}{dt} = k_X (a - x), \quad (1)$$

де a — число активних центрів, вільних від адсорбованих молекул поверхнево-активних речовин (ПАР), t - час протікання реакції, k – константа швидкості реакції утворення металевих зв'язків. Подібна реакція може бути описана формулою Арреніуса як термічно активована:

$$k_X = A \exp\left(-\frac{E_X}{R\vartheta}\right), \quad (2)$$

де E_x — енергія активації, A — предекспонент, R — газова постійна, ϑ — абсолютна температура. Інтегрування рівняння (1) приводить до виразу

$$x = a [1 - \exp(-k_X t)]. \quad (3)$$

Враховуючи, що $t = \frac{d}{v}$, де d - характерний розмір (наприклад, плями торкання), v - швидкість відносного переміщення при терті, одержимо

$$x = a \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{d}{v} A \exp\left(-\frac{E_X}{R\vartheta}\right)\right] \right\}. \quad (4)$$

Розкладаємо вираз у фігурних дужках у ряд Маклорена. При $x \ll a$ степенями вище першого можна зневажити і число зв'язків, що утворилися, буде обернено пропорційно швидкості. Якщо $x \approx a$, то від швидкості його значення залежати не буде. Для неширокого інтервалу швидкостей, згідно [7]

$$x \approx a \left[\left(\frac{d}{v}\right)^m \exp\left(-\frac{E_X}{R\vartheta}\right) \right], \quad (5)$$

де $m < 1$.

Число вільних активних центрів на площі фактичного контакту визнача-

ється площею фактичного контакту A_r і часток θ поверхні, зайнятий адсорбованими молекулами ПАР:

$$a = k_a (1 - \theta) A_r. \quad (6)$$

Для пластичного контакту, що найбільш імовірний при заїданні, $A_r = \frac{P}{H}$ [1], де P - контактне навантаження, H - твердість по Брінелю, тобто

$$a \approx k_a (1 - \theta) \frac{P}{H}. \quad (7)$$

Згідно [1, 3], для бінарних розчинів ПАР

$$\theta = \frac{k' c_2}{1 + (k' - 1) c_2}, \quad (8)$$

де $k' = k'_0 \exp \left\{ -\frac{1}{R \vartheta} \left[(\mu_{2,a}^0 - \mu_{1,a}^0) - (\mu_2^0 - \mu_1^0) \right] \right\}$, k'_0 - постійна для даного масла і присадки, $\mu_{2,a}^0$ і $\mu_{1,a}^0$ - стандартні хімічні потенціали присадки і масла в поверхневому шарі, μ_2^0 і μ_1^0 - те ж у розчині, c_2 - об'ємна концентрація ПАР в розчині:

$$1 - \theta = \frac{1 - c_2}{1 + (k' - 1) c_2}. \quad (9)$$

При $c_2 \ll 1$ (мала концентрація) і $k' \gg 1$ (сильна адсорбція)

$$1 - \theta \approx \frac{1}{k' c_2}.$$

У вузькому інтервалі концентрацій

$$1 - \theta \approx \frac{1}{k' c_2^n}. \quad (10)$$

де $n < 1$.

Після підстановки з рівняння (10) у рівняння (5) і деяких нескладних перетворень одержимо для $x = x_{кр}$ (тобто коли температура дорівнює критичній)

$$\vartheta_{KP} = \frac{\Delta \mu + E_X}{R \left[B_1 - \ln \left(c^n \nu^m \frac{H}{P} \right) \right]}, \quad (11)$$

де $\Delta \mu = \left[(\mu_{2,a}^0 - \mu_{1,a}^0) - (\mu_2^0 - \mu_1^0) \right]$, B_1 - добуток величин, передбачуваних для даного трибосполучення постійними.

Рівняння (11) є аналітичною моделлю критичної температури в умовах абразивного зношування.

Утворення модифікованих шарів на місцях контакту описується в першому наближенні кінетичним рівнянням першого порядку, тобто

$$\frac{dy}{dt} = k_y (a_2 - y), \quad (12)$$

де a_2 — число активних центрів, вільних від модифікованого шару, на яких, однак, адсорбувались активні молекули мастильного матеріалу, не здатні при те-

мпературах, характерних для \mathcal{G}_{XM} , ефективно розділяти контактуючі поверхні; k_y — константа швидкості реакції утворення хімічно модифікованих шарів. Інтегруючи рівняння (12), одержимо

$$y = a_2 [1 - \exp(-k_y t_s)], \quad (13)$$

де $k_y = A_2 \exp\left(-\frac{E_P}{R\mathcal{G}}\right)$, E_P — енергія активації утворення модифікованого шару;

A_2 — предекспонент реакції, $t_s = \frac{S}{v}$, час, за який відбувається ріст модифікованого шару. Після підстановок і перетворень, подібних наведеним вище, одержимо

$$y = a_2 \left(\frac{S}{v}\right)^m A_2 \exp\left(-\frac{E_P}{R\mathcal{G}}\right). \quad (14)$$

Неважко бачити, що $a_2 = k_{a_2} \beta'$, де k_{a_2} — постійна, $\beta' = k_C c_2^n$, c_2 — концентрація хімічно активного елемента в розчині, n — показник степені. Формула для розрахунку β' отримана за аналогією з виводом формули (10)

$$k_C \approx k_{C_0} \exp\left(\frac{\Delta\mu}{R\mathcal{G}}\right).$$

Тоді після підстановки

$$y = c_2^n k_p \left(\frac{S}{v}\right)^m \exp\left(\frac{\Delta\mu - E_P}{R\mathcal{G}}\right), \quad (15)$$

де $k_p = k_a A_r k_{C_0}$.

При $y=y_{KP}$, $\mathcal{G} = \mathcal{G}_{XM}$. У цьому випадку після нескладних перетворень одержуємо

$$\mathcal{G}_{XM} = \frac{E_P - \Delta\mu}{R \left[B_2 + \ln\left(\frac{c_2^n S^m}{v^m}\right) \right]}, \quad (16)$$

де $B_2 = -\ln\left(\frac{y_{KP}}{k_p}\right)$.

Для пружнопластичного контакту [5]

$$S = \frac{2,8 R_a^{0,7} r^{0,5}}{\theta_*^{0,1} p_c^{0,4}}, \quad (17)$$

де R_a — середнє арифметичне відхилення профілю, r — приведений радіус нерівностей, $\theta_* = \frac{1-\mu_*^2}{E}$ — пружна постійна матеріалу, μ — коефіцієнт Пуассона, E — модуль пружності, p_c — контурний тиск.

Для постійної шорсткості при абразивному зношуванні

$$\mathcal{G}_{XM} = \frac{E_P - \Delta\mu}{R \left[B_2^* + \ln\left(\frac{c^n}{v^m p_c^{0,4}}\right) \right]}, \quad (18)$$

де B_2^* - величина, постійна для даного трибосполучення.

Отримана модель (16) може бути використана для прогнозування температур хімічної модифікації за відомим значенням B_2 , n , m і $E_p - \Delta\mu$. Експериментальне визначення всіх цих величин, однак, важко, тому що вимагає експерименту з варіюванням p , v і s . Більш просто визначити не величину $(E_p - \Delta\mu)$, а величину пропорційну. Так, температурним методом при варіюванні s можна оцінити величину $\frac{1}{n}(E_p - \Delta\mu)$, при варіюванні v - величину $m(E_p - \Delta\mu)$.

Є інший варіант безпосереднього визначення величини $(E_p - \Delta\mu)$. Він заснований на елегантній ідеї Кінгсбюрі, що визначає теплоту адсорбції ПАР шляхом обробки залежності коефіцієнта тертя від швидкості ковзання v [1].

Більш докладно ця ділянка показана на рис. 1. Тут f_M — максимальний коефіцієнт тертя, в основному обумовлений металевим контактом; f_{XM} — коефіцієнт тертя, що встановився після досягнення ϱ_{XM} і визначає тертя по модифікованому шарі; f_i - коефіцієнт тертя при поточній температурі, що визначається як частковим металевим контактом, так і частковим контактом через модифікований шар. Тоді за аналогією з моделлю контакту при граничному мащенні Боудена

$$f_i = f_{XM} \beta + f_M (1 - \beta), \quad (19)$$

де β - імовірність контакту через модифікований шар. Звідки

$$\beta = \frac{f_i - f_M}{f_{XM} - f_M}. \quad (20)$$

Формула (15) для постійних s , S , v може бути спрощена до виду

$$y = k_{\Sigma} \exp\left(\frac{\Delta\mu - E_p}{R\varrho}\right), \quad (21)$$

де k_{Σ} — постійна, що об'єднує всі величини, які передбачаються постійними для даного трибосполучення. Оскільки $y \sim \beta$, одержуємо формулу для оцінки $(\Delta\mu - E_p)$:

$$\frac{f_i - f_M}{f_{XM} - f_M} = k \exp\left(\frac{\Delta\mu - E_p}{R\varrho}\right), \quad (22)$$

де k — коефіцієнт. Після логарифмування

$$\ln\left(\frac{f_i - f_M}{f_{XM} - f_M}\right) = \frac{\Delta\mu - E_p}{R\varrho} + const. \quad (23)$$

Критична температура реалізується при $x = x_{кр}$. Відповідно до кінетичного рівняння першого порядку ріст числа металевих зв'язків може бути представлений як

$$\frac{dx}{dt} = k_X (a_3 - x), \quad (24)$$

де a_3 - число активних центрів, на яких відсутній модифікований шар.

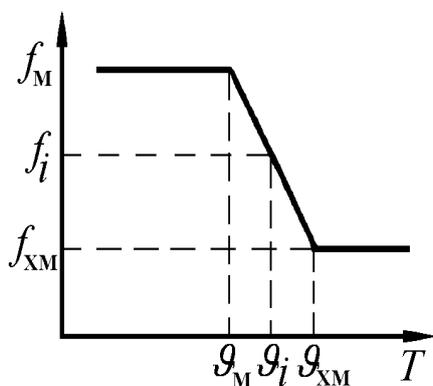


Рис. 1. Ділянка залежності коефіцієнта тертя від температури при хімічному модифікуванні (абразивне

Після інтегрування

$$x = a_3 [1 - \exp(-k_X t_l)], \quad (25)$$

де $t_l = \frac{l}{v}$.

Після ряду перетворень

$$x = a_3 \left(\frac{l}{v}\right)^{m_1} A_3 \exp\left(-\frac{E_X}{R \vartheta_3}\right), \quad (26)$$

де $m' < 1$, ϑ_3 - температура, при якій відбувається схоплювання.

Число активних центрів, на яких відсутній модифікований шар, тим більше, чим більше активних центрів, на яких цей центр зношений у процесі тертя (позначимо їх число через x_l), і тем менше, чим менше число активних центрів, на яких модифікований шар встиг утворитися (вище це число позначене через y). З іншого боку, величина a_3 буде тим більше, чим більше фактична площа контакту і чим більша кількість проходів нерівності, що зношує, за розглянутий час буде мати місце. У першому наближенні

$$a_3 = k_{a_3} A_r \frac{vt x_1}{L y}, \quad (27)$$

де k_{a_3} - коефіцієнт, t - час процесу тертя, L - шлях, на якому здійснюється процес тертя. Якщо заїдання здійснюється за один прохід, то $\frac{vt}{L} = 1$; A_r - площа фактичного контакту.

Так як друга критична температура досить висока (> 900 K), необхідно враховувати вплив температури на твердість контактуючих матеріалів. При пластичному контакті $A_r = \frac{P}{H_T}$, де H_T - твердість більш м'якого матеріалу трибосполучення при температурі випробувань.

У першому наближенні

$$H_T = H_0 \exp(-\varepsilon \Delta\mu), \quad (28)$$

де H_0 - твердість, визначена при температурі ϑ_0 ,

$$\Delta\vartheta = \vartheta_{KP_2} - \vartheta_0.$$

Як уже постульовано вище, зношування описується кінетичним рівнянням як термічно активуєма псевдохімічна реакція:

$$x_l = a'_3 [1 - \exp(-k_{x_1} t_l)], \quad (29)$$

де a'_3 - можлива кількість активних центрів на одиниці поверхні, покритої модифікованим шаром,

$$k_{x_1} = k'_0 \exp\left(-\frac{E_{II}}{R \vartheta_{II}}\right),$$

де E_{II} - енергія активації процесу зношування модифікованих шарів, ϑ_{II} - температура, при якій відбувається зношування.

Процес утворення модифікованих шарів (як і вище) описуємо кінетичним

рівнянням першого порядку. За аналогією з формулою (15) цей опис має вигляд

$$y = c_2^n k_P \left(\frac{S}{\nu} \right)^{m_2} \exp \left(\frac{\Delta \mu - E_P}{R \vartheta_P} \right), \quad (30)$$

де ϑ_P – температура, при якій відбувається реакція утворення хімічно модифікованих шарів.

При $\vartheta \approx \vartheta_3 \approx \vartheta_{II} \approx \vartheta_P$

$$x = k^* \frac{P}{H_T} \frac{\nu^m}{c_2^n} \frac{l^{m_1}}{S^{m_2}} \exp \left(\frac{-E_n - \Delta \mu + E_P - E_X}{R \vartheta} \right),$$

де $m = l - m_2 + m_1$; k^* поєднує величини, передбачувані постійними, звідки при $x = x_{KP}$, тобто $\vartheta = \vartheta_{KP_2}$, після нескладних перетворень

$$\vartheta_{KP_2} = \frac{E_{II} + \Delta \mu + E_X - E_P}{R \left[B_3 + \ln \left(\frac{P}{H_T} \frac{t}{L} \frac{\nu^m l^{m_1}}{S^{m_2} c_2^n} \right) \right]}, \quad (31)$$

де $B_3 = -\ln \left(\frac{x_{KP}}{k^*} \right)$.

Таким чином, росту третьої перехідної температури сприяє збільшення концентрації хімічно активного компонента мастильного матеріалу, твердості контактуючих деталей, розміру одиничної плями контакту, а також зниження коефіцієнта ε . Отже, матеріал, у меншому ступені втрачає твердість в міру нагрівання, більшою мірою стійкий проти заїдання. Значний вплив мають на величину ϑ_{KP_2} енергія активації утворення металевих зв'язків E_X і енергія активації зношування модифікованих шарів E_{II} в умовах абразивного зношування.

Об'єм зношеного матеріалу V у першому наближенні пропорційний числу утворених металевих зв'язків x , площі фактичного контакту сполучених поверхонь A_r і шляху тертя L , тобто

$$V = k'_V x A_r L, \quad (32)$$

де k'_V - постійна, характерна для даного трибосполучення.

Процес утворення металевих зв'язків у першому наближенні може бути описаний кінетичним рівнянням першого порядку. Після перетворення, подібного проведеного вище, одержимо формулу, аналогічну (5)

$$x \approx a \left[\left(\frac{d}{\nu} \right)^m \exp \left(-\frac{E_X}{R \vartheta} \right) \right]. \quad (33)$$

Число вільних активних центрів на одиниці площі контакту визначається формулою (10); тоді для пластичного контакту

$$V = \frac{k'_V N \gamma L}{c^n \nu^m H} \exp \left(-\frac{\Delta \mu + E_X}{R \vartheta} \right), \quad (34)$$

де $k'_V = \frac{k'_V d^m}{k'}$, N - контактне навантаження, $\gamma = \left(1 + 3f^2 \right)^{\frac{1}{2}}$ враховує, що тиск

плинності (тобто 1/3 твердості) зменшується при ковзанні в порівнянні зі статичними умовами навантаження, f - коефіцієнт тертя, інші позначення визначені вище. Варто мати на увазі, що при напіввідинному мащенні потрібно замість N брати величину $(N' - N_0)$, де N' - загальне контактне навантаження, N_0 - навантаження, що сприймається шаром рідини при абразивному зношуванні.

З іншого боку, рівняння (11) при постійних швидкостях, навантаженні і концентрації ПАР в інактивному маслі може бути записане як

$$\mathcal{G}_{KP} = G_1 (\Delta\mu + E_X). \quad (35)$$

Порівнюємо рівняння (30) і (34). Під знаком експоненти в них записані ті самі величини (крім частки в рівнянні (34)).

Тоді при постійних c , v , N , \mathcal{G}

$$V \approx \frac{G_2}{G_1'} \exp(-\mathcal{G}_{KP}), \quad (36)$$

де $G_1' = \exp\left(-\frac{1}{G_1}\right)$, G_2 - поєднує величини, прийняті постійними.

Або, спрощуючи, позначивши $\frac{G_2}{G_1'} = g$, розкладаємо експонентний спів-

множник у формулі (36) у ряд Маклорена і, обмежившись для простоти двома першими членами, одержимо

$$V = g(1 - \mathcal{G}_{KP}). \quad (37)$$

Таким чином, відповідно до формули (37) повинна бути лінійна залежність між V і \mathcal{G}_{KP} . Покажемо, що вона відповідає експериментальним даним. Раніше [1, 3] паралельно визначені критичні температури 13 мастильних композицій, що представляють собою 5%-ні розчини елементоорганічних ПАР у вазеліновому медичному маслі, а також об'ємні зноси роликів зі сталі 45 за 1 км шляхи в середовищі цих мастильних композицій. Критичні температури визначалися температурним методом за ДСТ 17604-86, зноси - на машині МИ при навантаженні 200 Н за методикою [1]. Як видно з рис. 2, зворотний лінійний зв'язок між критичними температурами мастильних композицій і об'ємним зношуванням зразків у середовищі цих рідин дійсно має місце. Отже, формула (34) може бути використана для оцінки зношування сталей при граничному змащенні в середовищі поверхнево-активних мастильних матеріалів. Відзначимо, що раціонально використати цю формулу в перетвореному виді, що дозволяє визначити інтенсивність об'ємного I_V (або лінійного I_h) зношування, що набагато зручніше при прогнозуванні ресурсу роботи трибосполучення, тобто

$$I_V = \frac{V}{L} = \frac{k_V \gamma}{c^n v^m} \frac{N' - N_0}{H} \exp\left(-\frac{\Delta\mu + E_X}{R\mathcal{G}}\right), \quad (38)$$

або

$$I_V = \frac{h}{L} = \frac{k_V \gamma}{c^n v^m} \frac{p - p_0}{H} \exp\left(-\frac{\Delta\mu + E_X}{R\mathcal{G}}\right), \quad (39)$$

де h - лінійне зношування, p_0 - тиск, при якому припиняється зношування вна-

слідок утворення в контактї рідинної плівки при абразивному зношуванні.

На жаль, формули типу (38) або (39) мають обмежене застосування на практиці, тому що сучасні високоефективні мастильні матеріали, як правило, включають хімічно активні присадки, що мають механізм мастильної дії, відмінний від механізму дії ПАР, хоча в деяких випадках зворотний лінійний зв'язок між V і $\vartheta_{кр}$ вдається одержати для моторних масел з м'якими хімічно активними присадками при паралельному випробуванні їх на моторному стенді ЗІЛ-130 і на чотирьохшариковій машині МАСТ-1 [1]. Тому пропонується модель для розрахунку корозійно-абразивного зношування, що реалізується в трибосполученнях у середовищі масел з ефективними хімічними активними присадками. Модель заснована на вже використаних вище поданнях про зношування як про термічно активуємий процес, тобто як про псевдо хімічної реакції. Розглядаємо випадок, коли хімічно активна присадка розчинена в інактивному маслі, причому останнє не перешкоджає адгезіоному і абразивному зношуванню по вершинах нерівностей. Далі припускаємо, що на поверхні фактичного контакту, покритої молекулами хімічно активної присадки при високих температурах, реалізованих при

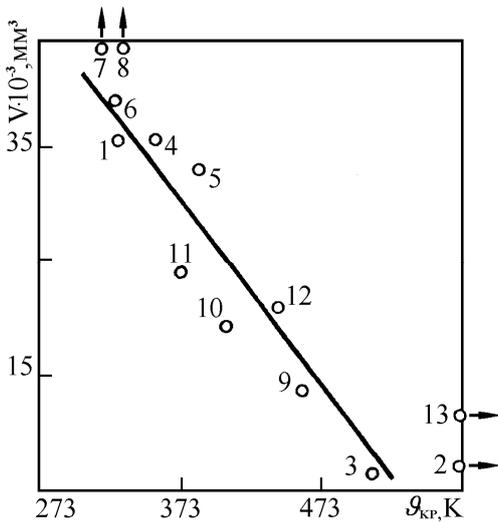


Рис. 2. Зв'язок між об'ємним зношуванням за 1 км шляхи сталевих зразків в 5%-ному розчині елементоорганічних присадок у вазеліновому маслі і критичних температурах цих мастильних композицій: 1 - базове масло; 2 - тетраацилат германію; 3 - тетраацилат кремнію; 4 - дитиофосфат триалкилолова; 5 - ацилат триалкилолова; 6 - ацилоксит триалкилолово; 7 - меркаптотриалкилолово; 8 - тетраалкилолово; 9 - тетраацилат олова; 10 - диацилат дибутилолово; 11 - алкилтриацилат олова; 12 - триацилат циклопентадієніл олова; 13 - алкилтриацилат кремнію

терті, має місце корозійно-абразивне зношування, а по частині, що залишилася, площі фактичного контакту - адгезійне. Подібні подання були висунуті в роботі [4].

В трибології найпоширенішою характеристикою процесу зношування є інтенсивність зношування (I_h або I_V), а в хімічній кінетиці реакція характеризується швидкістю реакції W . Якщо зношування розглядають як хімічну реакцію, то швидкість цієї реакції W_{II} . Знайдемо співвідношення між I_V і W_{II} :

$$I_V = \frac{W_{II} t}{L} = \frac{W_{II}}{v} \quad (40)$$

У більш загальному випадку

$$I_V = \frac{W_{II}}{v^m} \quad (41)$$

Питома швидкість реакції зношування (тобто швидкість на один структурний елемент W'_{II}), як постульовано вище,

$$W'_{II} = W'_{АДГ} + W'_{ХМ} = k_{АДГ}(1 - \theta_1)^n + k_{ХМ} \theta_1^n, \quad (42)$$

$$\theta_1 = \frac{k_a c_2}{1 - k_a c_2},$$

де θ_1 - поверхнева концентрація хімічно активної присадки, $k_{адг}$ - константа швидкості адгезійного зношування, $k_{хм}$ - константа швидкості корозійно-механічного зношування. Після підстановок з формули (42) в (41) з

урахуванням, що $W_{II} = W'_{II} A_r$, одержимо

$$I_V = \frac{1}{\nu^m} \left[\frac{k_{АДГ}}{(1 + k_a c_r)^{n_1}} + \left(\frac{k_a c_r}{1 + k_a c_r} \right)^n k_{ХМ} \right] \frac{N - N_0}{H}, \quad (43)$$

$$I_h = \frac{1}{\nu^m} \left[\frac{k_{АДГ}}{(1 + k_a c_r)^{n_1}} + \left(\frac{k_a c_r}{1 + k_a c_r} \right)^n k_{ХМ} \right] \frac{p - p_0}{H}. \quad (44)$$

Для практичного використання при допущенні слабкої залежності $k_{АДГ}$ від температури формула (44) може бути представлена як

$$I_h = \left[\frac{k_{II}}{(1 + k_a c_r)} + \frac{k_{ХМ}}{\nu^m} \left(\frac{k_a c_r}{1 + k_a c_r} \right)^n \right] \frac{p - p_0}{H}, \quad (45)$$

де k_{II} — коефіцієнт зношування в середовищі масла без присадки. Значення k_{II} частково табульовані [5].

В міру росту c_r збільшується частка поверхні, покритої молекулами присадки, а виходить, і частка корозійно-механічного зношування, в той час як частка адгезійного зношування відповідно падає. В остаточному підсумку, зношування в першому наближенні може бути визначений як корозійно-механічний. Тоді після ряду нескладних перетворень і допущень у найпершому наближенні формула (44) буде мати вигляд

$$I_{ХМ} \approx \frac{c^n \Pi}{\nu^m} \exp\left(-\frac{E_p - \Delta\mu}{R\vartheta}\right) (p - p_0), \quad (46)$$

де Π - добуток всіх величин, передбачуваних для даного трибосполучення постійними.

$$\text{Далі, згідно [2]} \quad I_h = k_C (p - p_0). \quad (47)$$

Після підстановки формули (46) в (47) і деяких перетворень одержимо

$$k_C \approx \frac{c^n \Pi}{\nu^m} \left(1 - \frac{E_p - \Delta\mu}{R\vartheta} \right), \quad (48)$$

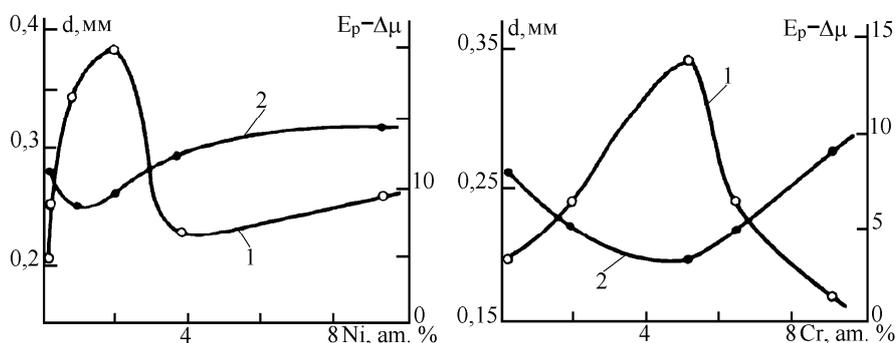


Рис. 3. Залежність енергії активації процесу взаємодії присадки з металом (1) і величини зношування (2) від змісту легуючих елементів: а - для системи вазелінове масло з 1% присадки ЛЗ-23к - сталь, легована нікелем; б — для системи вазелінове масло з 1,5% присадки ХП — сталь, легована хромом.

тобто фактор зношування k_C при постійних c , ν і ϑ лінійно пов'язаний з $(E_p - \Delta\mu)$.

Якісним підтвердженням формули (46) є рис. 3, у якому зіставлені енергії активації хімічного модифікування $(E_p - \Delta\mu)$, визначені за спрощеною методикою [7], з зносами зразків з легової сталі в середовищі відповідних ма-

стильних композицій. Більшим енергіям хімічного модифікування відповідають менші зноси зразків, і навпаки, як це і видно з формули (46).

Висновки. Таким чином, в результаті систематичного теоретичного і експериментального дослідження тертя та зношування при граничному мащенні з використанням кінетичного підходу показано, що основним критерієм як зношування, так і заїдання, а також температур утворення і руйнування мастильних плівок є енергії активації відповідних процесів. Оцінка енергій активації виконується по температурних залежностях коефіцієнта тертя, одержуваних при випробуванні мастильних матеріалів на лабораторних установках. Температурно-кінетичний підхід рекомендується для прогнозування мастильної здатності масел і пластичних мастил у режимі граничного мащення при абразивному зношуванні.

Література: 1. Матвиевский Р.М. и др. Смазочные материалы: антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний. Справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 224 с. 2. Расчет износостойкости трущихся деталей машин / Под ред. А.А. Благонравова. – М.: Изд. ВНИИНМАШ, 1972. – 72 с. 3. Коллинз Д. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ. Предсказание. Предотвращение. – М.: Мир, 1983. – 615 с. 4. Николас Г., Пригожин И. Познание сложного / Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 344 с. 5. Реология. Теория и приложения / Под ред. Э. Эйпиха. – М.: Иностран. лит-ра, 1962. – 822 с. 6. Приймаков О.Г., Градиський Ю.О. Теорія зносостійкої витривалості та її застосування в машинобудуванні. – Харків: Оберіг, 2009. – 316 с. 7. Приймаков О.Г., Стадніченко М.Г. Про механізми структурної пристосовуваності при абразивному зношуванні матеріалів. – Проблеми трибології. – 2004. – Вип. 2. – С. 113 – 122.

УКД 631.354:621.225: 621.891

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН ПУТЕМ КОНТРОЛЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СМАЗОЧНОЙ ПЛЕНКИ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ

Косолапов В.Б., канд. техн. наук, **Литовка С.В.** (г. Харьков, Украина)

In the article influence of load carrying capacity of lubricating film of working liquid of the transmission hydrodrive of combine harvester on its productivity has been investigated. It is shown that at decline of load carrying capacity of lubricating film of working liquid in the operation time there is a monotonous decline of the productivity of combine harveste.

Введение. Повышение эффективности использования мобильной сельскохозяйственной техники в значительной степени определяется гидрофикацией её ходовой системы. В настоящее время в конструкциях ходовой системы зерноуборочных комбайнов широко применяются гидростатические трансмиссии [1].

Анализ публикаций. Трансмиссия зерноуборочного комбайна Дон-1500 оснащена объемным гидроприводом типа ГСТ-90 [2]. В процессе эксплуатации привода трансмиссии по мере износа рабочих поверхностей увеличиваются зазоры и уменьшается давление нагнетания, что ведет к росту утечек рабочей жидкости (РЖ), а, следовательно, к снижению объемного и общего коэффициента полезного действия (КПД), и, в целом, производительности зерноуборочного комбайна.

Все гидроагрегаты ГСТ-90 периодически работают в условиях неустановившихся режимов нагружения, при которых возникает граничный режим смазки. Разрушение граничной смазочной пленки имеет большое значение для практики, так как может привести к катастрофическим последствиям при работе трибосистем в результате непосредственного контакта поверхностей, ведущего к схватыванию, заеданию и повышенному износу сопряженных деталей [3]. Максимальная внешняя нагрузка, при которой происходит разрушение смазочной пленки, называется ее несущей способностью [4].

Целью данной работы является повышение эффективности эксплуатации сельскохозяйственных машин путем контроля несущей способности смазочной пленки рабочей жидкости.

Методический подход. Производительность зерноуборочного комбайна может быть найдена по формуле [5]:

$$W = B \cdot v_{\delta} \cdot Q_{\zeta} \cdot \tau_{\bar{m}}, \quad (1)$$

где B – рабочая ширина захвата комбайна, м; v_{δ} – рабочая скорость комбайна при уборке, м/с; Q_{ζ} – урожайность зерна, кг/м²; $\tau_{\bar{m}}$ – коэффициент использования времени.

Проведя анализ формулы (1), установлено, что определяющее влияние на производительность зерноуборочного комбайна оказывает скорость его движения. После подстановки в уравнение рабочего баланса мощности зерноуборочного комбайна [6] соответствующих составляющих и преобразования уравнения, получаем зависимость для определения рабочей скорости зерноуборочного комбайна с учетом силовой загрузки двигателя:

$$v_{\delta} = \frac{N_e - \left(\frac{N_{\bar{A}\bar{A}\bar{I}\bar{\omega}} + N_{i\bar{n}}}{\eta_{\bar{A}\bar{A}\bar{I}}} \right)}{\frac{G_e \cdot (f_e \pm i)}{(\eta_{i\bar{r}} \cdot \eta_{1\bar{a}} \cdot \eta_{2i} \cdot \eta_{2\bar{a}} \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5) \cdot (1 - \delta_a)} + \frac{N_{i\bar{r}} \cdot Q_{\zeta} \cdot (1 + \delta_{\bar{n}}) \cdot B}{\eta_{\bar{A}\bar{A}\bar{I}}}}, \quad (2)$$

где N_e – эффективная мощность двигателя, Вт; $N_{i\bar{n}}$ – мощность, потребляемая измельчителем соломы, Вт; $N_{\bar{A}\bar{A}\bar{I}\bar{\omega}}$ – потеря мощности на холостой ход рабочих органов и механизмов комбайна, Вт; $N_{i\bar{r}}$ – удельная мощность на технологический процесс, Вт/(кг/с); G_e – эксплуатационный вес комбайна, Н; f_e – коэффициент сопротивления качению комбайна; i – уклон местности; δ_a – коэффициент буксования; Q_{ζ} – урожайность зерна, кг/м²; $\delta_{\bar{n}}$ – коэффициент соломистости культуры; $\eta_{i\bar{r}}$ – коэффициент подачи насоса; $\eta_{i\bar{r}}$ – гидромеханический КПД насоса; η_{2i} – объемный КПД мотора; $\eta_{2\bar{a}}$ – гидромеханический КПД мотора; η_3 – КПД диапазона коробки скоростей; η_4 – КПД главной передачи и дифференциала; η_5 – КПД бортовых передач; B – рабочая ширина захвата комбайна, м; $\eta_{\bar{A}\bar{A}\bar{I}}$ – КПД, учитывающий потери мощности в связи с передачей энергии на привод основных и вспомогательных рабочих органов и холостой ход механизмов комбайна.

Анализ выражения (2) показывает, что одни из величин, влияющих на рабочую скорость комбайна при уборке урожая, являются коэффициент подачи насоса и объемный КПД мотора.

Коэффициент подачи насоса с учетом выражения общего расхода утечки рабочей жидкости через кольцевую щель поршневой пары [7] и начальной приработки поверхностей выразиться как

$$\eta_{1i} = \eta_0 - \frac{\Delta P \cdot (\delta_0 + \Delta \delta)^3}{3 \cdot \mu \cdot L^2 \cdot D_{\dot{A}\delta} \cdot \omega}, \quad (3)$$

где η_0 – коэффициент подачи насоса после приработки трибосистем; ΔP – перепад давления жидкости в полостях перед поршнем и за поршнем, Па; L – длина поршня или щели, м; μ – динамическая вязкость жидкости, кг/(м·с); $D_{\dot{A}\delta}$ – диаметр втулки, м; ω – номинальная угловая скорость, с⁻¹; δ_0 – начальный зазор между поршнем и втулкой, м; $\Delta \delta$ – изменение зазора поверхностей поршня и втулки в процессе работы, м.

Аналогичным образом определяем объемный КПД мотора

$$\eta_{2i} = \frac{D_{\dot{A}\delta} \cdot L \cdot \omega}{D_{\dot{A}\delta} \cdot L \cdot \omega + \frac{\Delta P \cdot (\delta_0 + \Delta \delta)^3}{3 \cdot \mu \cdot L}} - 0,05, \quad (4)$$

где 0,05 – значение, учитывающее падение объемного КПД мотора при приработке поверхностей.

Моделирование производится ориентируясь на паспортные данные зерноуборочного комбайна Дон-1500, по урожайности и солоmistости культуры приняты средние величины. В качестве исследуемой рабочей жидкости применялось гидравлическое масло МГЕ-46В с различной наработкой. Отбор проб производился из системы привода трансмиссии зерноуборочного комбайна Дон-1500. Свойства РЖ соответствуют ТУ 38 001347-83.

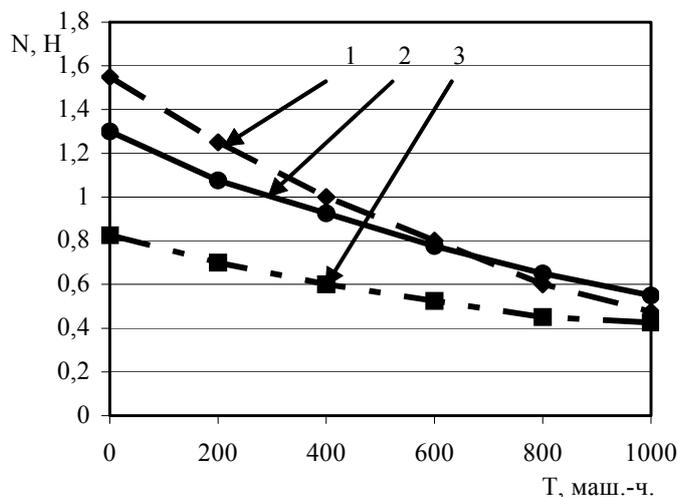


Рис. 1. График зависимости несущей способности смазочной пленки от наработки РЖ (1 – 293 К, 2 – 323 К, 3 – 353 К).

Экспериментальные исследования. Экспериментальные исследования несущей способности смазочной пленки, как функции наработки РЖ, проводились на устройстве, описанном в работе [8] при следующих условиях: нагружение контакта «шарик-шарик» – пошаговое, массой 0,010 кг; температура РЖ варьировалась в диапазоне 293..353 К, шаг 30 К; время выдержки трибосопряжения в среде РЖ без нагрузки после снятия оксидного слоя 600 с.

Результаты эксперимента

по определению зависимости несущей способности смазочной пленки от наработки РЖ в процессе ее эксплуатации приведены на рис. 1.

Как видно из графика, представленного на рисунке 1, функции несущей способности смазочной пленки носят монотонно убывающий характер с увеличением наработки РЖ. Наиболее интенсивное снижение несущей способности пленки наблюдается при температуре 293 К. При температуре 353 К значения несущей способности пленки смазочной пленки минимальны.

Экспериментальные исследования износа поверхностей трения от наработки РЖ проводились на пирамиде шариков, используемой в четырехшариковой машине трения МАСТ – 1, при следующих условиях: температура РЖ, $t = 323$ К; скорость вращения шарика, $v = 1,84 \cdot 10^{-3}$ м/с; нагрузка в контакте варьировалась в пределах $N = 1$ Н; наработка РЖ варьировалась в пределах $T = 0..1000$ маш.-ч.; чистота РЖ не ниже 10 класса по ГОСТ 17216-2001; время нагружения трибосопряжения принималось равным 1800 с.

Результаты экспериментального исследования зависимости износа поверхностей трения от наработки РЖ в условиях граничной смазки представлены на рис. 2.

Анализ результатов испытаний гидравлического масла МГЕ-46В на рис. 2. показал, что функция износа от наработки РЖ носит нелинейный характер и с увеличением наработки скорость износа сопряжения увеличивается.

Четырехшариковая машина трения МАСТ – 1 моделирует контакт высших кинематических пар, к которым относится контакт поршневой пары аксиальнопоршневого насоса в условиях граничной смазки. Данное утверждение позволяет принять правомерным условие адекватности изменения износа шариков и зазора поршневой пары аксиальнопоршневого насоса.

Условие адекватности имеет вид

$$\frac{d_i}{d_0} = \frac{\delta_i}{\delta_0}, \quad (5)$$

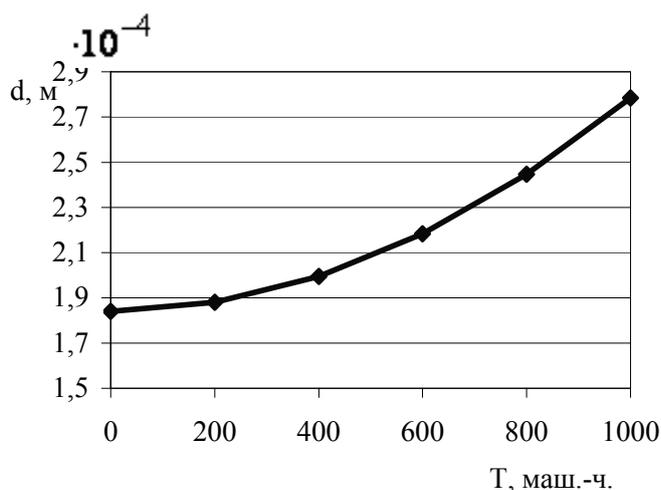


Рис.2. График функции диаметра пятна износа в зависимости от наработки РЖ ($N = 1$ Н, $n = 0,4$ с⁻¹, $t = 323$ К).

где d_i – диаметр пятна износа при i -той наработке РЖ, м; d_0 – диаметр пятна износа при использовании РЖ в состоянии поставки, м; δ_i – зазор поршневой пары при i -той наработке РЖ, м; δ_0 – зазор поршневой пары при использовании РЖ в состоянии поставки, м.

Зная зависимость несущей способности смазочной пленки от наработки РЖ (рис. 1) и диаметра пятна износа от наработки РЖ (рис. 2) графоаналитическим методом определим зави-

симось износа от несущей способности смазочной пленки (рис. 3).

Для адекватной оценки экспериментальных данных значения величин приводим в относительных единицах. Данные приводим при температуре РЖ 323 К.

Относительная несущая способность смазочной пленки выразиться как

$$\psi = \frac{N_i}{N_0} \quad (6)$$

где N_i – несущая способность смазочной пленки при i -той наработке РЖ, Н; N_0 – несущая способность смазочной пленки РЖ в состоянии поставки, Н.

Относительный диаметр пятна износа

$$\varpi = \frac{d_i}{d_0} \quad (7)$$

Результаты проведенных исследований зависимости относительного диаметра пятна износа от относительной несущей способности смазочной пленки РЖ приведены на графике (рис. 3).

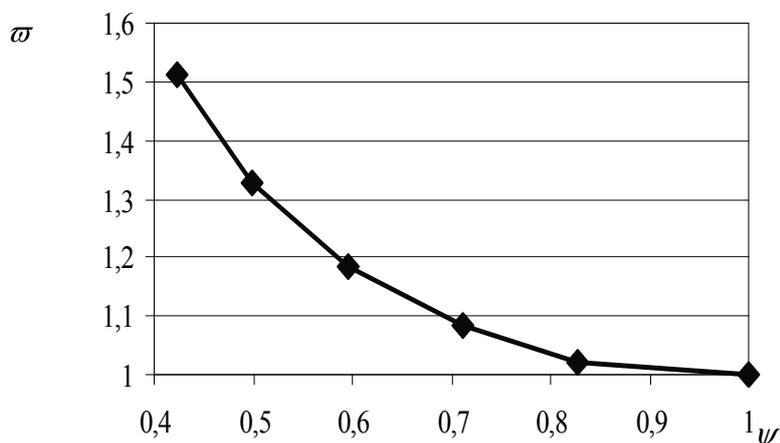


Рис. 3. График зависимости относительного зазора поршневой пары от относительной несущей способности смазочной пленки РЖ.

По данным, приведенным на рисунке 3, была получена зависимость, описывающая закономерность изменения относительного зазора поршневой пары от относительной несущей способности смазочной пленки РЖ

$$\frac{\delta_i}{\delta_0} \left(\frac{N_i}{N_0} \right) = 2,1094 \cdot \left(\frac{N_i}{N_0} \right)^2 - 3,8447 \cdot \frac{N_i}{N_0} + 2,7432, \quad (8)$$

величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9936$.

Производим расчет производительности зерноуборочного комбайна при начальном и текущих значениях зазора поршневой пары по формуле (1) и вычисляем относительную производительность

$$\Delta W = \frac{W_i}{W_0}, \quad (9)$$

где W_i – производительность комбайна при текущем зазоре поршневой пары, кг/с; W_0 – производительность комбайна при начальном зазоре поршневой па-

ры, кг/с.

Результаты расчетов относительной производительности зерноуборочного комбайна представлены на рис. 4.

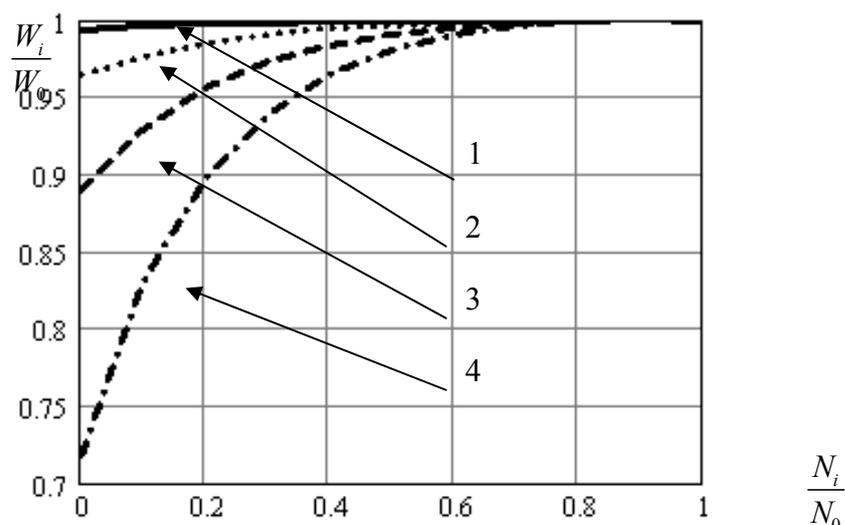


Рис. 4. График зависимости относительной производительности зерноуборочного комбайна от относительной несущей способности смазочной пленки РЖ: 1 – $\delta_0 = 10 \cdot 10^{-6}$ м, 2 – $\delta_0 = 20 \cdot 10^{-6}$ м, 3 – $\delta_0 = 30 \cdot 10^{-6}$ м, 4 – $\delta_0 = 40 \cdot 10^{-6}$ м.

Как видно из графика на рисунке 4 при снижении несущей способности смазочной пленки РЖ происходит нелинейное снижение производительности зерноуборочного комбайна. При этом, чем больше начальная величина зазора поршневой пары, тем интенсивнее осуществляется падение производительности комбайна. При этом возникает задача контроля несущей способности смазочной пленки РЖ для поддержания производительности машины на высоком уровне.

Вывод. Несущая способность смазочной пленки РЖ в процессе эксплуатации зерноуборочного комбайна снижается, в результате чего происходит снижение его производительности. Контроль несущей способности смазочной пленки рабочей жидкости позволяет своевременно производить ее замену, тем самым повышая эффективность эксплуатации СХМ.

Литература: 1. Гідропривід сільськогосподарської техніки: Навчальне видання / О.М. Погорілець, М.С. Волинський, В.Д. Войтюк, С.І. Пастушенко; За ред. О.М. Погорілець. – К.: Вища освіта, 2004. – 368 с. 2. Зерноуборочные комбайны «Дон» / Ю.А. Песков, И.К. Мещеряков, Ю.Н. Ярмашев, А.Р. Распопов и др. – М.: Агропромиздат, 1986. – 333 с. 3. Гаркунов Д. Н., Корник П. И. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин. – М.: Изд-во МСХА, 2003. – 344 с. 4. Повышение ресурса технических систем путём использования электрических и магнитных полей / Александров Е.Е., Кравец И.А., Лысиков Е.Н., Масюткин Е.П., Просвирина В.И., Соловьёв О.В, Тропина А.А. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – 544с. 5. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку: Підручник / Д.Г. Войтюк, В.М.Барановський, В.М.Булгаков та ін.; За ред. Д.Г. Войтюка. – К.: Вища освіта, 2005. – 464 с. 6. Зерноуборочные комбайны / Г.Ф. Серый, Н.И. Косилов, Ю.Н. Ярмашев, А.И. Русанов. – М.: Агропромиздат, 1986. – 248 с. 7. Волков А.А. Выбор конструктивных параметров опорных поверхностей гидравлических насосов: [учебное пособие] / Волков А.А. – М.: МАИ, 1999. – 48 с. 8. Литовка С.В. Влияние эксплуатационных параметров рабочей жидкости гидропривода на стойкость адсорбционной пленки к внешней нагрузке в режиме граничного трения / С.В. Литовка // Проблемы трибології. – 2008. – № 4 (59). – С. 22–25.

УКД 631.354:621.225: 621.891

ВЛИЯНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СМАЗОЧНОЙ ПЛЕНКИ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ ГИДРОПРИВОДА ТРАНСМИССИИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА НА ЕГО ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

Косолапов В.Б., канд. техн. наук, Литовка С.В. (г. Харьков, Украина)

In the article influence of load carrying capacity of lubricating film of working liquid of the transmission hydrodrive of combine harvester on its productivity has been investigated. It is shown that at decline of load carrying capacity of lubricating film of working liquid in the operation time there is a monotonous decline of the productivity of combine harvester.

Введение. Одним из важных условий повышения эксплуатационных и технико-экономических характеристик СХМ является применение гидроприводов. В настоящее время в конструкциях зерноуборочных комбайнов широко применяются гидравлические исполнительные механизмы для привода рабочих органов, в системах управления, а также в качестве гидравлических трансмиссий [1].

Трансмиссия зерноуборочного комбайна Дон-1500 оснащена объемным гидроприводом типа ГСТ-90 [2]. В процессе эксплуатации привода трансмиссии по мере износа рабочих поверхностей увеличиваются зазоры и уменьшается давление нагнетания, что ведет к росту утечек рабочей жидкости (РЖ), а следовательно, к снижению объемного и общего коэффициент полезного действия (КПД), частоты вращения, крутящего момента, эффективной мощности ГСТ-90 и, в целом, производительности зерноуборочного комбайна.

Все гидроагрегаты ГСТ-90 периодически работают в условиях неустановившихся режимов нагружения, при которых возникает граничный режим смазки. Разрушение граничной смазочной пленки имеет большое значение для практики, так как может привести к катастрофическим последствиям при работе трибосистем в результате непосредственного контакта поверхностей, ведущего к схватыванию, заеданию и повышенному износу сопряженных деталей [3].

Способность смазочной пленки разделять поверхности трения определяется прочностью структурированного слоя поверхностно-активных веществ, адсорбированных на поверхности, т.е. способностью такого слоя выдерживать без разрушения внешние нагрузки. Максимальная внешняя нагрузка, при которой происходит разрушение смазочной пленки, называется ее несущей способностью [4].

Целью данной работы является определение влияния несущей способности смазочной пленки рабочей жидкости гидропривода трансмиссии зерноуборочного комбайна на его производительность.

Методический подход. Производительность зерноуборочного комбайна может быть найдена по формуле [5]:

$$W = B \cdot v_{\delta} \cdot Q_{\zeta} \cdot \tau_{\dot{m}} , \quad (1)$$

где B – рабочая ширина захвата комбайна, м; v_{δ} – рабочая скорость комбайна при уборке, м/с; Q_{ζ} – урожайность зерна, кг/м²; $\tau_{\dot{m}}$ – коэффициент использования времени.

Проведя анализ формулы (1), установлено, что определяющее влияние на производительность зерноуборочного комбайна оказывает скорость его движе-

ния. После подстановки в уравнение рабочего баланса мощности зерноуборочного комбайна [6] соответствующих составляющих и преобразования уравнения, получаем зависимость для определения рабочей скорости зерноуборочного комбайна с учетом силовой загрузки двигателя:

$$v_{\delta} = \frac{N_e - \left(\frac{N_{\hat{A}\hat{A}\hat{I}}_{\delta\delta} + N_{i\hat{n}}}{\eta_{\hat{A}\hat{A}\hat{I}}} \right)}{\frac{G_{\hat{e}} \cdot (f_{\hat{e}} \pm i)}{(\eta_{1i} \cdot \eta_{1\hat{a}\hat{i}} \cdot \eta_{2i} \cdot \eta_{2\hat{a}\hat{i}} \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5) \cdot (1 - \delta_a)} + \frac{N_{i\hat{i}} \cdot Q_{\hat{c}} \cdot (1 + \delta_{\hat{n}}) \cdot B}{\eta_{\hat{A}\hat{A}\hat{I}}}}, \quad (2)$$

где N_e – эффективная мощность двигателя, Вт; $N_{i\hat{n}}$ – мощность, потребляемая измельчителем соломы, Вт; $N_{\hat{A}\hat{A}\hat{I}}_{\delta\delta}$ – потеря мощности на холостой ход рабочих органов и механизмов комбайна, Вт; $N_{i\hat{i}}$ – удельная мощность на технологический процесс, Вт/(кг/с); $G_{\hat{e}}$ – эксплуатационный вес комбайна, Н; $f_{\hat{e}}$ – коэффициент сопротивления качению комбайна; i – уклон местности; δ_a – коэффициент буксования; $Q_{\hat{c}}$ – урожайность зерна, кг/м²; $\delta_{\hat{n}}$ – коэффициент солоmistости культуры; η_{1i} – коэффициент подачи насоса; η_{1i} – гидромеханический КПД насоса; η_{2i} – объемный КПД мотора; $\eta_{2\hat{a}\hat{i}}$ – гидромеханический КПД мотора; η_3 – КПД диапазона коробки скоростей; η_4 – КПД главной передачи и дифференциала; η_5 – КПД бортовых передач; B – рабочая ширина захвата комбайна, м; $\eta_{\hat{A}\hat{A}\hat{I}}$ – КПД, учитывающий потери мощности в связи с передачей энергии на привод основных и вспомогательных рабочих органов и холостой ход механизмов комбайна.

Анализ выражения (2) показывает, что величинами, влияющих на рабочую скорость комбайна при уборке урожая при прочих равных условиях, являются коэффициент подачи насоса и объемный КПД мотора.

Коэффициент подачи насоса с учетом выражения общего расхода утечки рабочей жидкости через кольцевую щель поршневой пары [7] и начальной приработки поверхностей выразиться как

$$\eta_{1i} = \eta_0 - \frac{\Delta P \cdot (\delta_0 + \Delta\delta)^3}{3 \cdot \mu \cdot L^2 \cdot D_{\hat{A}\hat{O}} \cdot \omega}, \quad (3)$$

где η_0 – коэффициент подачи насоса после приработки трибосистем; ΔP – перепад давления жидкости в полостях перед поршнем и за поршнем, Па; L – длина поршня или щели, м; μ – динамическая вязкость жидкости, кг/(м·с); $D_{\hat{A}\hat{O}}$ – диаметр втулки, м; ω – номинальная угловая скорость, с⁻¹; δ_0 – начальный зазор между поршнем и втулкой, м; $\Delta\delta$ – изменение зазора поверхностей поршня и втулки в процессе работы, м.

Аналогичным образом определяем объемный КПД мотора

$$\eta_{2i} = \frac{D_{\hat{A}\hat{O}} \cdot L \cdot \omega}{D_{\hat{A}\hat{O}} \cdot L \cdot \omega + \frac{\Delta P \cdot (\delta_0 + \Delta\delta)^3}{3 \cdot \mu \cdot L}} - 0,05, \quad (4)$$

где 0,05 – значение, учитывающее падение объемного КПД мотора при обработке поверхностей.

Моделирование производится ориентируясь на паспортные данные зерноуборочного комбайна Дон-1500, по урожайности и соломистости культуры приняты средние величины. В качестве исследуемой рабочей жидкости применялось гидравлическое масло МГЕ-46В с различной наработкой. Отбор проб производился из системы привода трансмиссии зерноуборочного комбайна Дон-1500. Свойства РЖ соответствуют ТУ 38 001347-83.

Исследования несущей способности смазочной пленки. Проведенные исследования в работах [8, 9] позволили обосновать способ контроля несущей способности смазочной пленки РЖ, который реализован в устройстве [10]. Экспериментальные исследования несущей способности смазочной пленки, как функции наработки РЖ, проводились на этом устройстве, при следующих условиях: нагружение контакта «шарик–шарик» - пошаговое, массой 0,010 кг; температура РЖ варьировалась в диапазоне 293..353 К, шаг 30 К; время выдержки трибосопряжения в среде РЖ без нагрузки после снятия оксидного слоя 600 с.

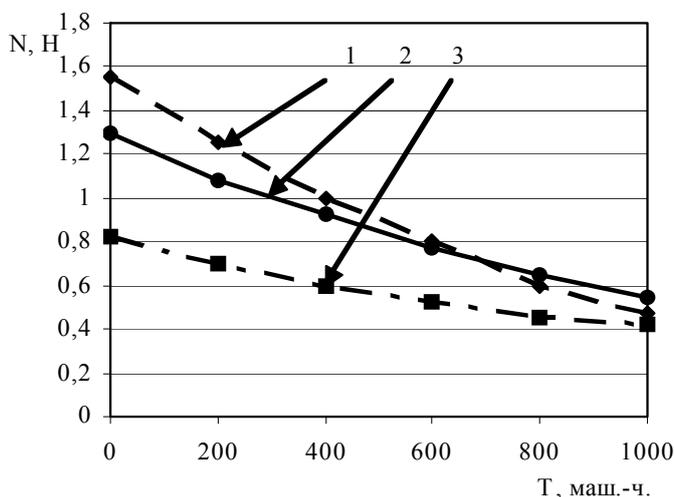


Рис. 1. График зависимости несущей способности смазочной пленки от наработки РЖ (1 – 293 К, 2 – 323 К, 3 – 353 К).

Результаты эксперимента по определению зависимости несущей способности смазочной пленки от наработки РЖ в процессе ее эксплуатации приведены на рисунке 1.

Как видно из графика, представленного на рисунке 1, функции несущей способности смазочной пленки носят монотонно убывающий характер с увеличением наработки РЖ. Наиболее интенсивное снижение несущей способности пленки наблюдается при температуре 293 К. При температуре 353К значения несущей способности пленки смазочной пленки минимальны.

Экспериментальные исследования износа поверхностей трения от наработки РЖ проводились на пирамиде шариков, используемой в четырехшариковой машине трения МАСТ – 1, при следующих условиях: температура РЖ, $t = 323$ К; скорость вращения шарика, $v = 1,84 \cdot 10^{-3}$ м/с; нагрузка в контакте варьировалась в пределах $N = 1$ Н; наработка РЖ варьировалась в пределах $T = 0..1000$ маш.-ч.; чистота РЖ не ниже 10 класса по ГОСТ 17216-2001; время нагружения трибосопряжения принималось равным 1800 с.

Результаты экспериментального исследования зависимости износа поверхностей трения от наработки РЖ в условиях граничной смазки представлены на рис. 2.

Анализ результатов испытаний гидравлического масла МГЕ-46В на рис. 2. показал, что функция износа от наработки РЖ носит нелинейный характер и с увеличением наработки скорость износа сопряжения увеличивается.

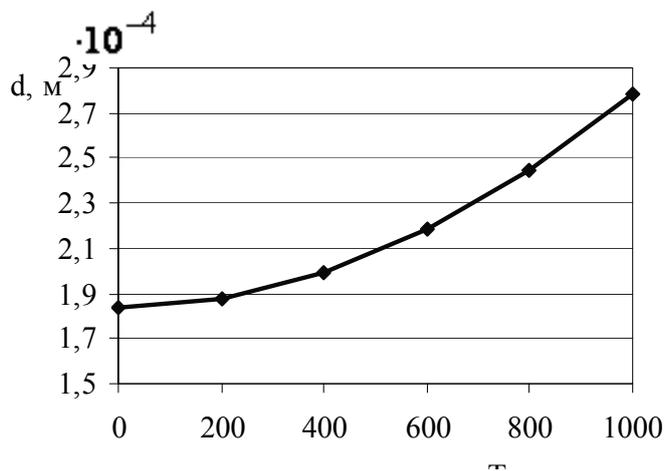


Рис.2. График функции диаметра пятна износа в зависимости от наработки РЖ ($N = 1 \text{ Н}$, $n = 0,4 \text{ с}^{-1}$, $t = 323 \text{ К}$).

$$\frac{d_i}{d_0} = \frac{\delta_i}{\delta_0}, \quad (5)$$

где d_i – диаметр пятна износа при i -той наработке РЖ, м; d_0 – диаметр пятна износа при использовании РЖ в состоянии поставки, м; δ_i – зазор поршневой пары при i -той наработке РЖ, м; δ_0 – зазор поршневой пары при использовании РЖ в состоянии поставки, м.

Зная зависимость несущей способности смазочной пленки от наработки РЖ (рис. 1) и диаметра пятна износа от наработки РЖ (рис. 2) графоаналитическим методом определим зависимость износа от несущей способности смазочной пленки (рис. 3).

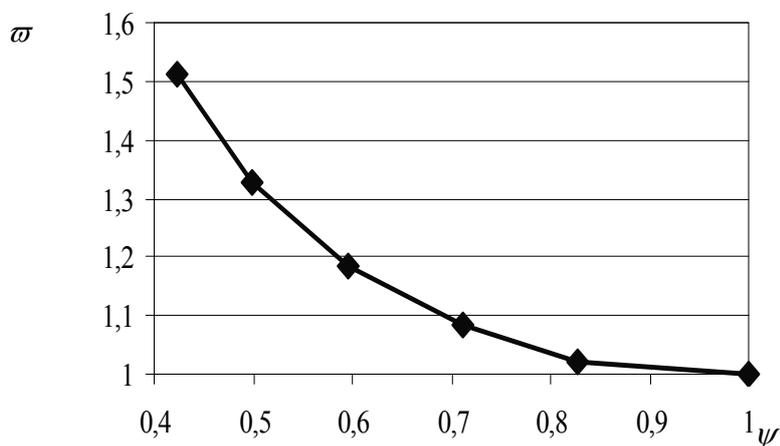


Рис. 3. График зависимости относительного зазора поршневой пары от относительной несущей способности смазочной пленки РЖ.

Для адекватной оценки экспериментальных данных значения величин приводим в относительных единицах. Данные приводим при температуре РЖ 323 К.

Относительная несущая способность смазочной пленки выразиться как

$$\psi = \frac{N_i}{N_0} \quad (6)$$

Четырехшариковая машина трения МАСТ – 1 моделирует контакт высших кинематических пар, к которым относится контакт поршневой пары аксиальнопоршневого насоса в условиях граничной смазки. Данное утверждение позволяет принять правомерным условие адекватности изменения износа шариков и зазора поршневой пары аксиальнопоршневого насоса.

Условие адекватности имеет вид

где N_i – несущая способность смазочной пленки при i -той наработке РЖ, Н;
 N_0 – несущая способность смазочной пленки РЖ в состоянии поставки, Н.

Относительный диаметр пятна износа

$$\varpi = \frac{d_i}{d_0} \quad (7)$$

Результаты проведенных исследований зависимости относительного диаметра пятна износа от относительной несущей способности смазочной пленки РЖ приведены на графике (рис. 3).

По данным, приведенным на рисунке 3, была получена зависимость, описывающая закономерность изменения относительного зазора поршневой пары от относительной несущей способности смазочной пленки РЖ

$$\frac{\delta_i}{\delta_0} \left(\frac{N_i}{N_0} \right) = 2,1094 \cdot \left(\frac{N_i}{N_0} \right)^2 - 3,8447 \cdot \frac{N_i}{N_0} + 2,7432, \quad (8)$$

величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9936$.

Производим расчет производительности зерноуборочного комбайна при начальном и текущих значениях зазора поршневой пары по формуле (1) и вычисляем относительную производительность

$$\Delta W = \frac{W_i}{W_0}, \quad (9)$$

где W_i – производительность комбайна при текущем зазоре поршневой пары, кг/с;
 W_0 – производительность комбайна при начальном зазоре поршневой пары, кг/с.

Результаты расчетов относительной производительности зерноуборочного комбайна представлены на рис. 4.

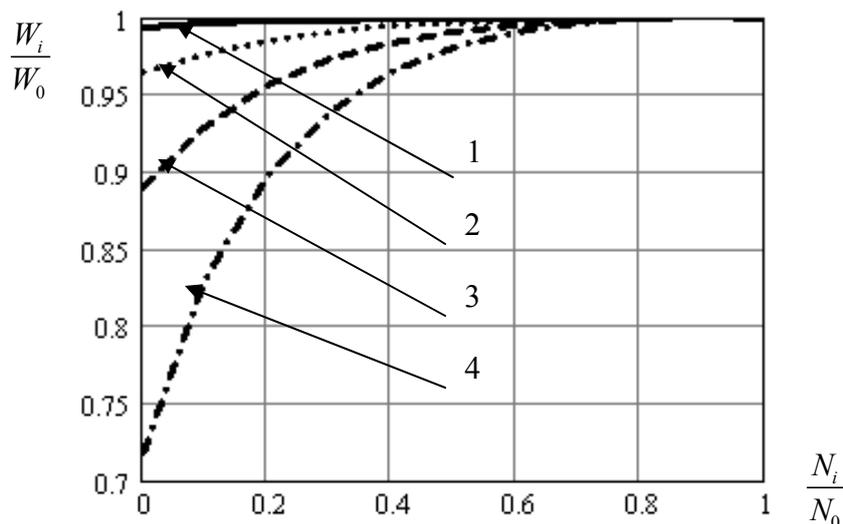


Рис. 4. График зависимости относительной производительности зерноуборочного комбайна от относительной несущей способности смазочной пленки РЖ: 1 – $\delta_0 = 10 \cdot 10^{-6}$ м, 2 – $\delta_0 = 20 \cdot 10^{-6}$ м, 3 – $\delta_0 = 30 \cdot 10^{-6}$ м, 4 – $\delta_0 = 40 \cdot 10^{-6}$ м.

Как видно из графика на рисунке 4 при снижении несущей способности смазочной пленки РЖ происходит монотонное снижение производительности зерноуборочного комбайна. При этом, чем больше начальная величина зазора

поршневої пари, тем інтенсивніше здійснюється падіння продуктивності комбайна.

Висновок. Несуча здатність мастильної плівки РЖ суттєво впливає на продуктивність зернозбирального комбайна. При зниженні несучої здатності мастильної плівки РЖ в процесі експлуатації відбувається монотонне зниження продуктивності зернозбирального комбайна. При цьому виникає завдання контролю несучої здатності мастильної плівки РЖ для підтримання продуктивності машини на високому рівні.

Література: 1. Гідропривід сільськогосподарської техніки: Навчальне видання / О.М. Погорілець, М.С. Волинський, В.Д. Войтюк, С.І. Пастушенко; За ред. О.М. Погорілець. – К.: Вища освіта, 2004. – 368 с. 2. Зернозбиральні комбайни «Дон» / Ю.А. Песков, І.К. Мещеряков, Ю.Н. Ярмашев, А.Р. Распопов і др. – М.: Агропромиздат, 1986. – 333 с. 3. Гаркунов Д. Н., Корник П. І. Види тертя і зносу. Експлуатаційні пошкодження деталей машин. – М.: Изд-во МСХА, 2003. – 344 с. 4. Підвищення ресурсу технічних систем шляхом використання електричних і магнітних полів / Александров Е.Е., Кравець І.А., Лысиков Е.Н., Масюткин Е.П., Просвірин В.І., Солов'єв О.В, Тропина А.А. – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – 544с. 5. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку: Підручник / Д.Г. Войтюк, В.М.Барановський, В.М.Булгаков та ін.; За ред. Д.Г. Войтюка. – К.: Вища освіта, 2005. – 464 с. 6. Зернозбиральні комбайни / Г.Ф. Серій, Н.І. Косилов, Ю.Н. Ярмашев, А.І. Русанов. – М.: Агропромиздат, 1986. – 248 с. 7. Волков А.А. Вибір конструктивних параметрів опорних поверхностей гідравлических насосів: [учебне посібник] / Волков А.А. – М.: МАИ, 1999. – 48 с. 8. Косолапов В.Б. Підвищення надійності об'ємних гідроприводів шляхом підбору раціональної мікрогеометрії трибосопряжень / В.Б. Косолапов, С.В. Литовка, С.А. Хаас // Вісник ХНТУСГ. – Харків: СПДФО Вороток В.В. – 2007. – №51. – С. 178–185. 9. Косолапов В.Б. Вплив товщини мастильної плівки на ресурс гідропривода мобільних машин / В.Б. Косолапов, С.В. Литовка // Вісник ХНТУСГ. – Харків: СПДФО Вороток В.В. – 2009. – №76. – С. 387–392. 10. Литовка С.В. Вплив експлуатаційних параметрів робочої рідини гідропривода на стійкість адсорбційної плівки к зовнішній навантаженню в режимі граничного тертя / С.В. Литовка // Проблеми трибології. – 2008. – № 4 (59). – С. 22–25.

УДК 621 (725 – 771) : 669,15.668,15.1

ТЕХНОЛОГІЯ ШТАМПУВАННЯ РІЗАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОРМОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА „МАРАЛ”

Браташевський О. Ю., канд. техн. наук, **Полякова А.Г.**, **Горбачова Л.В.**,
Клочко О.Ю., **Польотов В.А.**, **Бобровицький В. О.**
(Харків, Україна)

Technology of stamping for cutting elements of fodder chopper "Maral".

Різальні елементи, ножі (рис. 1), кормозбирального комбайна „Марал” виготовляються із листового прокату товщиною 4 – 5мм шляхом: вирізування пластин гільотинними ножицями по зовнішньому контуру, фрезерування або заточування дугоподібної сторони, пробивання овальних отворів і заточування різальної кромки. В результаті ніж приймає форму пластини – паралелограму довжиною 608мм і шириною 95мм. Одна з довжин цієї пластини виконується у вигляді зовнішньої дуги радіусом 11255мм і має скос на 30°, який утворює різальну кромку ножа. В середині пластини – ножа, вздовж його довжини, пробиваються п'ять овальних отворів для кріплення ножа до роздільного барабану. Це закрі-

плення ножа здійснюється за допомогою притискної пластини і болтів. Така конфігурація ножа пояснюється умовами його експлуатації [1], які слід розглядати в контексті загальної роботи комбайна. Для цього використовуємо рис. 2.

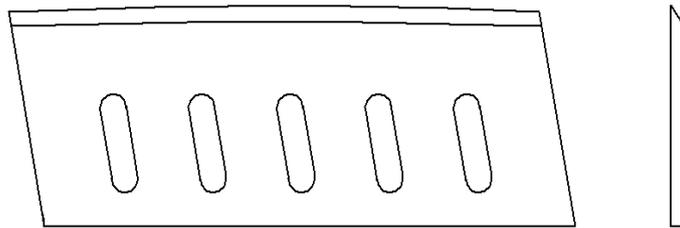


Рис. 1. Схематичне зображення ножа комбайна „Марал”.

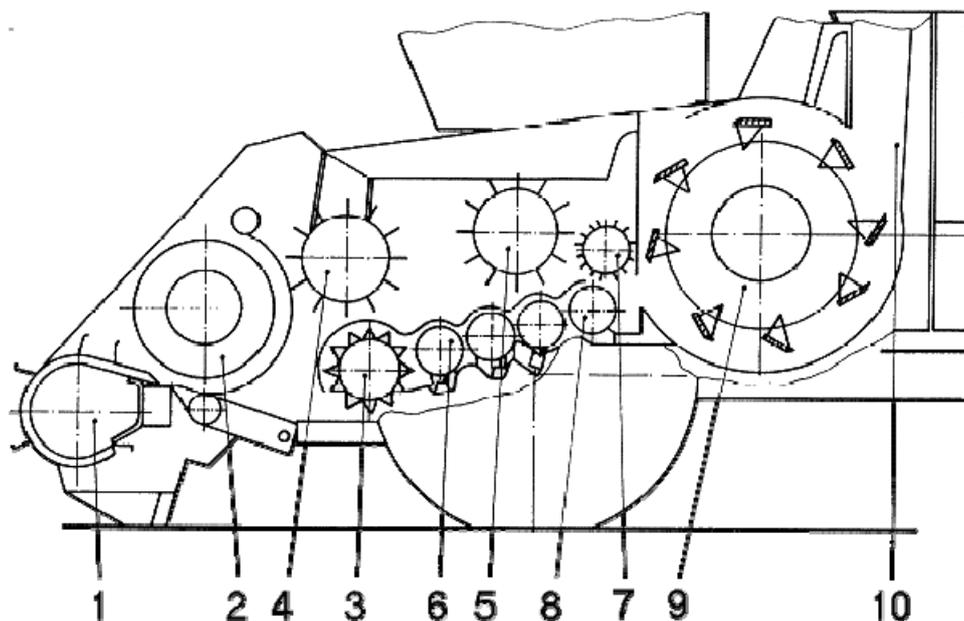


Рис. 2. Схема розміщення робочих органів комбайна „Марал”: 1 – барабан-підборщик; 2 – поперечний шнек; 3 – живільний валець; 4 – подаючий валець; 5 – підпресовуючий валець; 6 – нижній пресуючий валець; 7 – пресуючий валець; 8 – гладкий валець; 9 – роздрібнювальний барабан; 10 – розвантажувальний канал.

Збираєма культура після скошування потрапляє у барабан-підборщик (1), поперечний транспортує шнек (2) звужує потік рослинної маси до розміру ширини каналу живільного апарата. Прийомку звуженого, таким чином, потоку від середньої частини поперечного транспортує шнека забезпечують знизу живільний валець (3), а зверху подаючий валець (4). Ці робочі органи разом із нижніми вальцями (6) направляють попередньо ущільнений потік збираємої культури далі до підпресовуючого вальця (5), де відбувається подальше ущільнення рослинної маси. Наступний пресуючий пристрій, який складається з пресуючого вальця (7) і гладкого вальця (8), ще більше ущільнює потік збираємої культури і направляє його у роздрібнювальний барабан (9). Швидкість подачі цього потоку може регулюватися для одержання різної довжини роздрібнювальної маси. Ця довжина роздрібнювання також змінюється при використанні різного числа ножів у роздрібнювальному барабані. Роздрібнювальний барабан є одночасно і різальний, і викидальний барабан. Він роздрібнює продукт і передає його крізь розвантажувальний канал (10) і силосопровід до транспортного

засобу. В процесі роботи ножі обертаються зі швидкістю до тисячі обертів на хвилину. Для полегшення процесу роздрібнювання зеленої маси різальна кромка ножа виконується у вигляді дуги, що змушує зелену масу пересуватися вздовж леза різальної кромки. Це зменшує силу різання, а, отже, полегшує роботу ножа і збільшує якість готового продукту.

Виконання дугоподібної різальної кромки ножа ускладнює технологію його виготовлення, оскільки потребує додаткових операцій фрезерування або заточування, що суттєво погіршує продуктивність технологічного процесу.

Мета даної роботи: збільшити продуктивність і зменшити трудоміскість процесу виготовлення ножей комбайна „Марал”.

Методика даної роботи складалася з визначення схеми і розрахунку параметрів технологічного процесу штампування ножа [2-3] (включно з проектуванням штампу і вибором преса), виготовлення штампа, штампування дослідної партії ножей і визначення економічної ефективності розробленого технологічного процесу штампування.

Аналіз конструкції ножа комбайна „Марал” і існуючої технології його виготовлення, яка була розглянута вище, показав, що цей технологічний процес має низьку продуктивність і високу трудоміскість із-за використання таких обробок, як фрезерування і свердління. В даній роботі запропоновано усунути перелічені недоліки шляхом заміни вказаних обробок різання однією, більш продуктивною і менш трудоміською, обробкою штампування. При цьому, операція вирубку ножа з дугоподібною стороною і операція пробивки п'яти овальних отворів об'єднуються і виконуються за одне дійство преса. В результаті запропонована така схема виготовлення ножа – вирізання прямокутних заготовок, ширина і довжина яких на 5-6мм перевищує відповідні розміри ножа для забезпечення якісного вирізання; штампування сумісної дії, тобто одночасно вирубка та пробивка; і заточка різальної кромки.

Розроблен штамп сумісної дії, робочими органами якого є – а) пуансон-матриця, яка має конфігурацію ножа з отворами і розміщується на нижній плиті; б) матриця, яка розміщується над пуансоном-матрицею і представляє собою рамку, внутрішній розмір якої відповідає розміру ножа, і в) п'ять пуансонів, які розміщуються на верхній плиті. Штамп працює таким чином. Заготовка розміщується на пуансоні-матриці. При штампуванні заготовка прижмається до пуансона-матриці, який рухається в напрямку матриці і разом з нею виконує операцію вирубку. В той же час п'ять пуансонів разом з пуансоном-матрицею виконують операцію пробивки отворів. Технологічне зусилля для виконання цих двох операцій складає 652,25т, а зусилля для прижиму заготовки 27,2т. Отже для штампування ножа потребується зусилля більше 679,45т. Відповідно до цього та розмірів ножа вибран прес з номінальним зусиллям 800т.

За розробленою технологією штампування було виготовлено 1200 ножів для кормозбиральних комбайнів „Марал” і оцінена їх економічна ефективність. В результаті було встановлено наступне. Розроблена технологія виготовлення ножа відрізняється від існуючої тим, що замість операцій: фрезерування дугоподібною стороною ножа, свердління та фрезерування п'яти овальних отворів, - виконується сумісне штампування. В результаті збільшується продуктивність

виготовлення ножа – штучний час при вказаних обробках різання складає 22 хв., а при штампуванні – 0,17хв. Окрім цього не потребується набору різального інструмента (фрези, свердла) і скорочується число потрібних для виготовлення ножа операцій з 39 до 3, що суттєво зменшує трудоміськість обробки.

Висновки: 1. Розроблена технологія штампування ножів кормозбираючого комбайна „Марал”, яка дозволила замінити існуючі обробки фрезерування і свердління сумісними операціями вирубки та пробивки. 2. Спроектован і виготовлен штамп для розробленої технології. Виготовлено 1200 штук ножів за розробленою технологією, які поставлені на кормозбираючі комбайни „Марал – 125М”. 3. Розроблена технологія дозволила збільшити продуктивність при виготовленні ножів більше ніж в сто разів і зменшити трудоміськість їх обробки.

Література: 1. Кормоуборочный комбайн Maral E281. Инструкция по эксплуатации. – LandTechnik AG. – Schoneback, Barbyer Strabe 0-3300 Schoneback (Elbe). – изделие 1, 1991. – 184 с., ил. 2. Технология листовой штамповки. Курсовое проектирование. Стеблюк В.И., Марченко В.Л., Белов В.В., Гривачевский А.Г. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1983. – 280 с. 3. Справочник по оборудованию для листовой штамповки // Л.И. Рудман, А.И. Зайчук, В.Л. Марченко и др.; Под общ. ред. Л.И. Рудмана. – К.: Техніка, 1989. – 231 с.

УДК 621 (725 – 771) : 669.15.668.15.1

ТЕХНОЛОГІЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ РІЗАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОРМОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА “МАРАЛ”

Браташевський О.Ю., канд. техн. наук, Польотов В.А.,
Полякова А.Г., Горбачова Л.В., Ключко О.Ю., Бобровицький В. О.
(м. Харків, Україна)

It was suggested steels, progressive and economic technology heat treatment for catting elements of fodder chopper "Maral".

Ніж (рис. 1) кормозбирального комбайна “Марал” являє собою сталеву пластину товщиною 4-5 мм, шириною 90-95 мм і довжиною 600 мм. Одна із кромок цієї довжини виконана у вигляді зовнішньої дуги з радіусом 11255 мм і має скос на 30°, який робить цю кромку ріжучою.

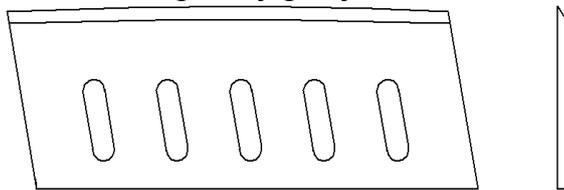


Рис. 1. Схематичне зображення ножа комбайна „Марал”.

Ці ножі закріплюють за допомогою болтів та притискних пластин на барабані під певним кутом до зовнішньої поверхні барабана різальними кромками назовні. В процесі роботи барабан обертається (до тисячі обертів на хвилину) і різальні кромки ножів розрізають зелену масу, яка певним чином подається до барабану, на дуже дрібні частки. Виконання різальної кромки ножа у вигляді дуги полегшує процес роздрібнювання зеленої маси завдяки тому, що змушує зелену масу пересуватися вздовж леза різальної кромки. Матеріалом, з якого, як правило, виготовляють ножі, є сталь 65Г. Ножі піддають гартуванню різальної кромки і низькому відпусканню на 52-58HRC. Додаткова умова – ножі в проце-

сі роботи не повинні пластично деформуватися, аби не привести до руйнування барабана. Навіть допускається крихке руйнування ножа в процесі роботи, але не пластичне деформування його. Таким чином, ножі кормозбирального комбайна “Марал” повинні мати високу твердість, високу границю текучості та низьку ударну в’язкість [1 - 3].

Мета даної роботи: оптимізувати склад сталі різальних елементів і розробити технологію їх термічної обробки для забезпечення високого рівня границі текучості і низьку ударну в’язкість.

Матеріалом дослідження були сталі ХВГ, 9ХС, 65Г, У8 та У10. Ці сталі піддавали гартуванню: сталі 9ХС, ХВГ і 65Г від 850-870°C, а сталі У8 і У10 від 750-800°C. Після гартування всі сталі відпускали при 200°C; 250°C; 300°C; 350°C та 400°C. У термооброблених таким чином сталях вимірювали твердість, границю текучості та ударну в’язкість при кімнатній температурі. Структуру сталей вивчали за допомогою мікроструктурного аналізу. За результатами дослідження вибирали сталі, з яких виготовляли різальні елементи (ножі) для комбайну “Марал” і піддавали їх термічній обробці за дослідженими режимами при одночасній доробці умов нагрівання під гартування. Врешті досліджені ножі проходили натурні випробування на комбайнах.

Результати дослідження наведено в таблиці.

Таблиця

Твердість (HRC), границя текучості (σ_m) та ударна в’язкість (a_n) досліджених сталей в залежності від температури відпускання

№ з/п	Марка сталі	Температура відпускання, °C	HRC	σ_m , МПа	a_n , КДж/м ²
1	ХВГ	200	60-62	1600	200
		250	58-60	1600	180
		300	56-58	1800	200
2	9ХС	200	60-62	1650	200
		300	58-60	1850	240
		350	56-59	1750	240
3	65Г	200	56-58	1600	100
		250	54-55	1850	120
		300	52-55	1950	140
		350	50-54	1850	150
4	У8	200	58-60	1600	250
		300	53-54	1650	250
		400	50-52	1250	270
5	У10	200	58-60	1700	190
		300	54-56	1900	210
		400	50-55	1650	220

Аналіз експериментальних даних показав, що після гартування всі досліджені сталі мають твердість приблизно одного рівня – більш за 60HRC. Після

відпускання при вибраних температурах твердість знижується незначно, але при температурах 250-350°C майже у всіх сталях відбувається помітне зростання границі текучості при незначному рості ударної в'язкості. Це відбувається завдяки структурним перетворенням, що мають місце в сталях при даних температурах. В районі температури 300°C залишковий аустеніт перетворюється в мартенсит відпускання, що супроводжується зростанням пружності сталі, а вуглець мартенситу ще не починає виділятися, чим зберігає високу міцність сталі і низьку пластичність.

Найбільше це проявляється в сталі 65Г, яка після відпускання при 300°C ± 50°C стає настільки пружною, що не піддається рихтуванню – при вигинанні сталі з'являються тріщини, а пластична деформація не відбувається. Менш за все це виражено в сталі У8, яка із збільшенням температури відпускання поступово втрачає пружність і все більше набирає пластичності.

Найбільш близькими до сталі 65Г в змінах механічних властивостей при відпусканні є сталі 9ХС та У10. При цьому, якщо сталь 9ХС має ще високу пружність (1750МПа) при температурі відпускання 350°C, то сталь У10 при температурі 400°C суттєво втрачає пружність (1650МПа). В той же час сталь У10 зберігає трохи більшу долю крихкості, ніж сталь 9ХС, про що свідчить ударна в'язкість цих сталей (відповідно 190-210КДж/м² проти 200-240КДж/м²).

Сталь ХВГ після відпускання при 250°C має більшу крихкість ніж не тільки сталь 9ХС, але й сталь У10 – її ударна в'язкість після вказаної термічної обробки складає 180КДж/м². При цьому, границя текучості цієї сталі нижча, ніж у сталей У10 і 65Г, але майже того ж рівня, що у сталі 9ХС, тобто 1800МПа проти 18500МПа.

Аналіз наведених результатів дозволяє виключити з групи досліджених сталей сталь У8, як таку, що має найменший рівень пружності і найбільшу ударну в'язкість після усіх режимів відпускання. Ці характеристики не дають гарантії крихкого руйнування ножа в процесі експлуатації.

Сталь 9ХС та У10, в порівнянні із сталлю 65Г, мають високу пружність, але й вищий рівень ударної в'язкості, тобто більшу долю пластичного деформування. При цьому, висока пружність сталі У10 тримається до температури відпускання 300°C, а після відпускання при 400°C ця пружність суттєво знижується. Ці сталі (9ХС та У10), за вказаними характеристиками, кращі за сталь У8.

Сталь ХВГ має пружність трохи більшу за пружність сталі 9ХС, хоча і меншу ніж у сталей 65Г та У10, але її ударна в'язкість майже того ж рівня, що й ударна в'язкість сталі 65Г. Найбільш ці характеристики наближені до одного рівня після відпускання сталі ХВГ при 250°C, а сталі 65Г при 300°C. Втім, сталь У10 після відпускання при 200°C має ударну в'язкість таку ж саму, що і сталь ХВГ після відпускання при 250°C, а пружність більшу (1700 МПа проти 1600 МПа).

Таким чином, можна визнати, що для ножів силосозбирального комбайну, найбільш сприятливі характеристики пружності та в'язкості мають такі сталі: ХВГ після відпускання при 250°C (пружність – 1600МПа, в'язкість – 180КДж/м²), 65Г після відпускання при 250°C та при 300°C (пружність – відповідно 1850 МПа та 1950 МПа, а в'язкість – відповідно 120КДж/м² та 140КДж/м²), У10 після відпускання при 200°C (міцність – 1700МПа, в'язкість –

190КДж/м²). При цьому, найкращі показники має сталь 65Г.

На підставі цих результатів були виготовлені ножі для трьох кормозбиральних комбайнів “Марал” із сталей ХВГ, 65Г та У10, термооброблені за вказаними режимами і встановлені на комбайни майже в однаковій кількості кожної сталі на кожний комбайн (по 3-4 ножа кожної сталі) для забезпечення ідентичних умов експлуатації всіх досліджених ножів.

При гартуванні різальних ножів було застосовано три способи нагрівання а) в камерній печі; б) за допомогою струмів високої частоти (СВЧ); в) нагрівання різальної кромки ножа в соляній ванні шляхом занурювання ножа в розплав солі на глибину 30-40мм.

Після гартування із використанням камерної печі 60-70% ножів мали короблення 10-20мм, при допустимому рівні 5мм. Ці короблені ножі не підлягали виправленню ані після гартування, ані після відпускання, із-за їх високої пружності, яка при рихтуванні приводила до утворювання тріщин. У зв'язку з цим, прийнято вважати цей спосіб нагрівання ножів не придатним.

Нагрівання під гартування ножів за допомогою СВЧ збільшило вартість обробки в декілька разів із-за коштовного обладнання для малої партії ножів, тому цей спосіб нагрівання визначили недоцільним з економічного боку. Затрати на використання СВЧ починають дорівнювати затратам на нагрівання в соляних ваннах, якщо партія ножів перевищує ≈ 10000 штук. При більших партіях нагрівання СВЧ стає економічно вигідним, ніж нагрівання в соляних ваннах, завдяки більшій продуктивності процесу.

В результаті було вибрано спосіб нагрівання під гартування ножів в соляних ваннах, як більш придатний і економічний для даного випадку.

Натурні випробування показали, що досліджені ножі мають однакову працездатність і не виявили в екстремальних умовах експлуатації (попадання в барабан металевих частин, каменів тощо) пластичного деформування і руйнування барабану. Тверді предмети, які потрапляли в працюючий барабан, приводили тільки до місцевого крихкого відколювання різальної кромки ножа, що не перешкоджало роботі комбайну. З економічної точки зору слід відмітити, що вартість сталі ХВГ в 1,5-1,7разів перевищує вартість сталей 65Г та У10, що є перешкодою до використання сталі ХВГ для вказаних потреб.

Отже, ножі для кормозбирального комбайна “Марал” можна виготовляти із сталей ХВГ, 65Г та У10 і піддавати їх термічній обробці за вказаними вище режимами, але, при цьому, найменш витратними будуть ножі із сталей 65Г та У10.

Висновки: 1. Для виготовлення різальних елементів кормозбирального комбайна “Марал” вибрані сталі ХВГ, 65Г та У10. 2. Встановлені режими термічної обробки ножів: для сталі ХВГ – гартування від 850-860°С в маслі і відпускання при 250°С; для сталі 65Г – гартування від 840-850°С в маслі і відпускання при 250-300°С; для сталі У10 – гартування від 780-800°С в маслі і відпускання при 200°С. 3. Технологічними особливостями термічної обробки ножів є те, що у випадку кількості ножів менш за 10000 штук нагрівання різальної кромки ножа під гартування виконують в соляній ванні шляхом занурювання ножа в розплав солі на глибину 30-40мм, а у випадку кількості ножів більш 10000 штук економічно доцільним стає нагрівання ножів за допомогою струмів висо-

кої частоти. Об'ємне ж гартування є не придатним із-за одержання після цього високого рівня короблення ножа – більш за допустимий. 4. Найменші витрати на виготовлення мають ножі, які виготовленні із сталей 65Г та У10.

Література: 1. Браташевський О.Ю., Полякова А.Г., Горбачова Л.В., Польотов В.А. Прогресивна технологія термічної обробки різальних елементів сільськогосподарських машин. – Труды 5-й Международной научно-технической конференции. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2002 – С. 427. 2. Браташевський А.Ю., Польотов В.А., Полякова А.Г., Горбачова Л.В., Каплуновський В.О. Дослідження критерію зносостійкості конструкційних сталей в умовах ударно – абразивного зносу. – Труды 6-й Международной научно-технической конференции. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2002 – С. 167-169. 3. Браташевський О.Ю., Полякова А.Г., Горбачова Л.В., Польотов В.А., Каплуновський В.О. Термічна обробка різальних елементів землерийних машин. – Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства, вип. 26. – Харків: ХДТУСГ, 2004 – С. 305-308.

УДК 621.771.63

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ПРИ ФОРМОВКЕ ПРОФИЛЕЙ В КАЛИБРАХ ВАЛКОВ, ОБРАЗОВАННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕПРИВОДНОГО ИНСТРУМЕНТА

Ахлестин А. В., аспирант, **Тришевский О. И.**, докт. техн. наук
(г. Харьков, Украина)

The data's on magnitude and distribution of speeds are reduced at a camber of a shelf of a channel section by molding elements of a different construction. For each of them the optimum ranges of corners of a camber are defined. Is shown, that most effective is the forming of roll-formed shapes in mills containing side cylindrical rollers.

Способ непрерывной валковой формовки полосовой заготовки является наиболее производительным процессом изготовления гнутых профилей и прямошовных электросварных труб. В последние годы стремительно возрастает спрос на профили, получаемые из тонколистового металла с защитно-декоративным покрытием. Постоянно повышаются требования к качеству изделий, прежде всего, к состоянию их лицевой поверхности.

Одним из наиболее простых и в то же время действенных путей решения этой задачи является расширение применения в конструкциях профилегибочного оборудования неприводного формующего инструмента [1-3]. Отличительной особенностью неприводного инструмента (вспомогательные ролики, роликовые узлы, свободно вращающиеся элементы валков, а также отдельные валки в целом) является то, что он приводится во вращение движущейся в стане полосой, осуществляя одновременно ее формоизменение. При этом за счет изменения скорости вращения такого инструмента относительно как смежного с ним приводного инструмента (или его элементов), так и формируемой полосы уменьшается относительное скольжение в калибрах валков, что способствует снижению энергозатрат на формовку и повышению качества профилей.

Считается [1, 2 и др.], что окружная скорость свободно вращающихся элементов валков примерно равна скорости движения полосы в стане. Однако, определение «примерно» не уточняется, условия применимости таких элементов не оговариваются. И это при том, что они имеют различную форму рабочей

поверхности (цилиндрическую, коническую, торобразную и др.), устанавливаются на подшипниках качения [1, 4], скольжения [1, 5 - 7], а то и вообще без них [8]. Данные о распределении скоростей по длине рабочей части неприводных элементов валков и роликов в литературе отсутствуют.

Схемы совместного использования основного (валков) и вспомогательного (неприводных роликов) формующего инструмента в одной рабочей клетки признаны наиболее эффективными [2, 3]. Однако исследований, подтверждающих это, практически нет. Исключение составляют работы [9, 10]. В первой из них на основании теоретического анализа показано, что применение традиционной универсальной клетки [2] вместо обычной двухвалковой клетки на заключительном этапе формовки швеллера позволяет снизить потребляемую мощность в 1,7 раза. В другой – экспериментально определены энергосиловые параметры в клетки со специально установленными неприводными роликами разной конструкции. Установлено, что при формовке в клетки с цилиндрическими роликами крутящий момент меньше на 57...66%. Конические ролики обеспечивают снижение момента на 30%.

Таким образом, процесс формовки с использованием неприводного инструмента изучен недостаточно, особенно в части скоростного режима. Имеющиеся экспериментальные данные значительно различаются. Эффективность применения такого инструмента в основном оценивается по величине крутящего момента.

Цель работы – аналитически определить распределение скоростей в калибрах валков, образованных с использованием неприводного формующего инструмента, и на этой основе оценить его эффективность.

Рассмотрим распределение скоростей в калибрах валков при формовке швеллера, как наиболее распространенного в сортаменте гнутых профилей и одного из основных типовых элементов профилей сложной конфигурации. В соответствии со схемами, приведенными в таблице, подгибка его полок осуществляется различным формующим инструментом: коническими элементами, жестко связанными с валом; свободно вращающимися коническими элементами; неприводными коническими роликами с вертикальной осью вращения; неприводными цилиндрическими роликами. При этом во всех вариантах исполнения нижний валок является приводным, а верхний – неприводной, цилиндрический.

Принимаем, что: формовка осуществляется в одной клетки; радиус скругления рабочей кромки верхнего валка – нулевой; скорость полосы равна окружной скорости цилиндрического элемента нижнего валка; массой неприводных элементов валков и роликов, а также силами трения в их опорах пренебрегаем; углы подгибки за проход до 10 градусов; величина и распределение давлений в калибрах валков одинаковы во всех рассматриваемых вариантах.

При непрерывном процессе формовки скорость V_n полосы (табл., вар. 1) является постоянной и равной $V_i = \omega \frac{D_0}{2}$, где ω – угловая скорость приводного валка; D_0 – диаметр цилиндрического элемента нижнего валка, а окружная скорость V_v верхнего валка соответственно равна скорости V_n полосы, которой он приводится во вращение. В связи с тем, что диаметры верхнего D_v и нижнего

D_0 валков не связаны жестко между собой, то величина D_6 может выбираться минимальной с учетом глубины H вреза калибра. Тогда угловая скорость ω_1 верхнего валка определяется из условия: $V_n = V_6$, т.е. $\omega_1 = \omega(D_0/D_6)$.

Таблица

Скорости полосы и формирующих элементов разных конструкций при подгибке полки профиля

Вариант	Схемы калибров валков	Эпюры скоростей	Изменение ΔV
I			
II			
III			
IV			

Согласно [11], наличие радиусов скругления r на верхнем валке уменьшает его катающий диаметр. Поскольку окружная скорость валка при этом не изменяется, то угловая – увеличится.

$$\omega'_1 = \omega(D_0/D'_{в.к.}),$$

где ω'_1 и $D'_{в.к.}$ угловая скорость и уменьшенный катающий диаметр верхнего валка соответственно.

С увеличением r и уменьшением ширины h цилиндрической части рабочей поверхности валка его скорость будет приближаться к величине, равной

$$V\hat{a} = \omega'_1 \left[\frac{D\hat{a}}{2} - r \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right) \right],$$

где α – угол подгибки полки.

При $h=0$ цилиндрическая часть нижнего валка отсутствует, и вместо формовки швеллера имеем формовку уголка. В этом случае катающий диаметр $D''_{в.к.}$ верхнего валка при прочих равных условиях становится минимальным, тогда

$$V\hat{a} = \omega''_1 \left[\frac{D\hat{a}}{2} - r(1 - \cos \alpha) \right],$$

где $\omega''_1 = \omega(D_0/D''_{в.к.})$.

Это подтверждается экспериментально [1]. При формовке уголка в дифференциальной клети зафиксировано уменьшение катающего диаметра верхнего валка до 17%.

Скорости точек на коническом элементе валка (табл., вар. I) возрастают с увеличением диаметра, на котором они расположены, и максимальное их значение составляет:

$$V_1 \max = \omega \left(\frac{D_0}{2} + H \right),$$

а разность между наибольшей скоростью конического элемента и скоростью полосы, т.е. наибольшая величина относительного скольжения равна:

$$\Delta V_1 = V_1 \max - V\hat{i} = \omega \cdot H = \omega \cdot b \cdot \sin \alpha,$$

где b – ширина подгибаемой полки.

Можно ΔV_1 выразить через скорость полосы:

$$\Delta V_1 = V\hat{i} \cdot \frac{2H}{D_0} = V\hat{i} \cdot k_1.$$

Назовем k – коэффициентом относительного скольжения. Он показывает во сколько раз величина этого скольжения отличается от скорости полосы.

Наглядное представление о контактном взаимодействии формующего инструмента и полосы дает рис. 1. В валках, выполненных из прозрачного материала по методике [12], отчетливо видны не только площадки контакта, но и следы скольжения конического элемента относительно подгибаемой полки (темная зона за дугой контакта 4 по направлению формовки). Они образованы срезанием слоя краски, предварительно нанесенной на полосу, микровыступами рабочей поверхности конического элемента.

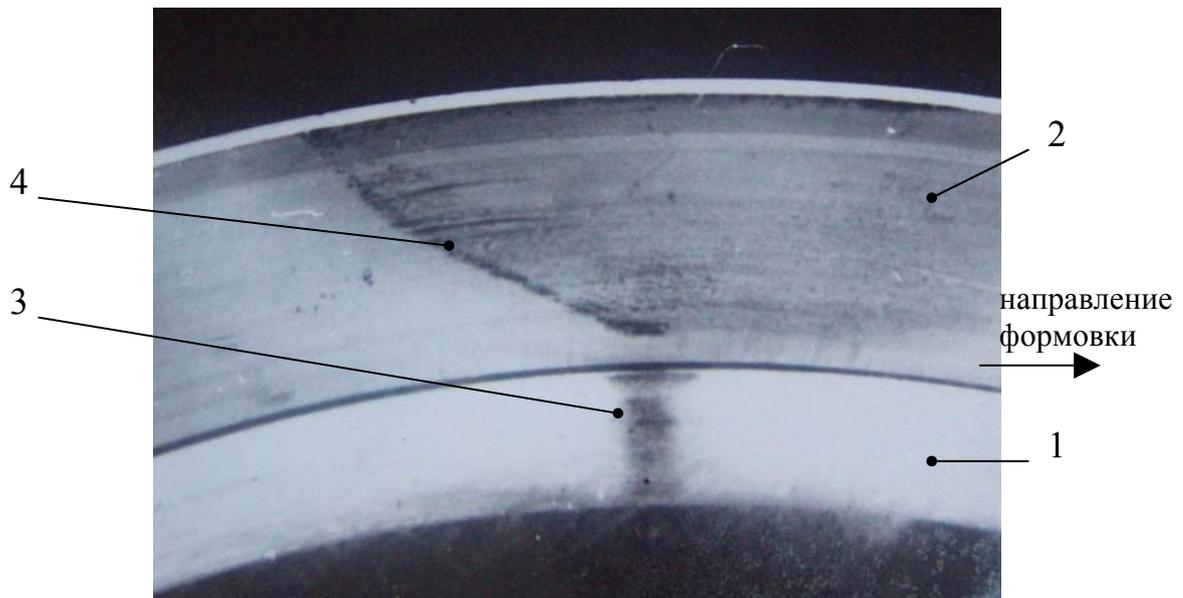


Рис. 1. Вид поверхности соприкосновения нижнего валка с формируемой полосой (1 и 2 – цилиндрический и конический элементы; 3 и 4 – площадки контакта на элементах 1 и 2 соответственно).

В случае выполнения конического элемента свободно вращающимся на подшипнике (табл., вар. II) картина распределения скоростей отличается от рассмотренной выше. В точке A , расположенной на диаметре D_A (катающий диаметр), скорости полосы и конического элемента совпадают. Выше этой точки скорость элемента больше скорости полосы, а ниже – меньше. Положение точки A определяется из условия минимума затраченной энергии на вращение неприводного элемента движущейся полосой. С учетом указанных выше допущений принимаем ее расположение на середине подгибаемой полки.

Для удобства сравнения эффективности применения всех вариантов исполнения калибров геометрические и кинематические параметры калибров с применением неприводных элементов (варианты II – IV) определим, выразив их через основные параметры D_0 , H , ω и V_n калибра с обычным приводным нижним валком (вариант I). Тогда

$$D_A = D_0 + H; \quad V_{2 \max} = \frac{\omega_2}{2} \cdot (D_A + H); \quad V_{2 \min} = \frac{\omega_2}{2} \cdot (D_A - H); \quad \omega_2 = \omega \cdot \frac{D_0}{D_0 + H}.$$

Очевидно, что $|\Delta V_2| = V_I \cdot \frac{\dot{I}}{D_0 + H}$.

Таким образом, для II варианта исполнения калибра валков $k_2 = \frac{H}{D_0 + H}$.

При подгибке полки коническим роликом с вертикальной осью (табл., вар. III) происходит почти то же самое, что и при использовании свободно вращающегося конического элемента. Однако, вследствие указанной ориентации оси ролика имеются и отличия. Так, скорости точек на ролике изменяются в противоположном направлении: выше точки A они уменьшаются, а ниже – увеличиваются. Величина диаметров, соответствующих точкам на конической поверхности ролика по высоте калибра, изменяется по другой закономерности. То же

можно сказать и о величине относительного скольжения.

Определяемые параметры приведем в окончательном виде:

$$d_1 = d_A + H \cdot \operatorname{ctg} \alpha; \quad d_2 = d_A - H \cdot \operatorname{ctg} \alpha; \quad \omega_3 = \omega \cdot \frac{D_0}{d_A};$$

$$V_{3 \max/\min} = V\dot{i} \cdot \frac{d_A \pm H \cdot \operatorname{ctg} \alpha}{d_A}; \quad \Delta V_3 = V\dot{i} \cdot \frac{H \cdot \operatorname{ctg} \alpha}{d_A}.$$

Если принять катающие диаметры конического ролика и свободно вращающегося элемента одинаковыми, т.е. $d_A = D_A = D_0 + H$, то $\omega_3 = \omega_2$, а

$$|\Delta V_3| = V\dot{i} \cdot \frac{H \cdot \operatorname{ctg} \alpha}{D_0 + H}; \quad k_3 = \frac{H \cdot \operatorname{ctg} \alpha}{D_0 + H}.$$

И, наконец, подгибка полки цилиндрическим роликом (табл., вар. IV), который установлен с возможностью изменения угла α наклона (подгибки) в осевой плоскости валков. Окружная скорость всех точек, расположенных на образующей цилиндрической поверхности ролика, практически равна скорости полосы, т.е. взаимодействие ролика и полосы осуществляется без проскальзывания, и на контактной поверхности реализуется трение качения.

Параметры этого варианта формовки таковы:

$$\omega_4 = \omega \cdot \frac{D_0}{d_4}; \quad |\Delta V_4| = 0; \quad k_4 = 0.$$

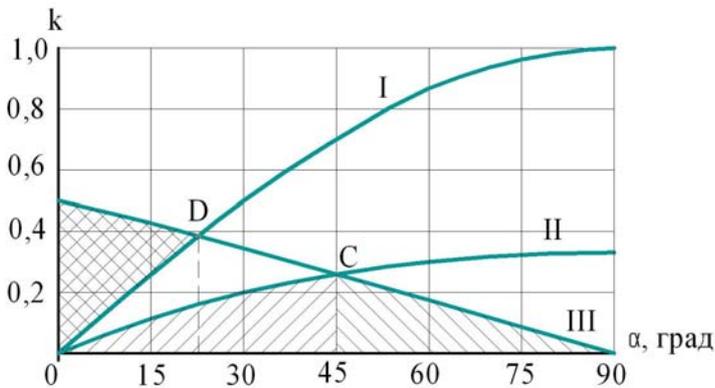


Рис. 2. Зависимость коэффициента k от угла подгибки полки элементами: I — коническим приводным; II — коническим свободно вращающимся; III — коническим роликом.

По мере подгибки полки от 0° до 90° изменяется величина k , а следовательно, и относительное скольжение ΔV . На рис. 2 представлены графики, характеризующие это изменение при определенных геометрических параметрах валков ($D_0 = 100$ мм) и формуемого профиля ($b=50$ мм). Наибольшая величина скольжения имеет место в калибре I, в 2 раза меньше она в калибре II, и в 3 раза — в калибре III. Кривая III (весьма

близкая к прямой линии) пересекается с кривыми II и I в точках C и D. Значения углов, соответствующих этим точкам, можно найти из условия равенства в них коэффициентов k .

$$\text{В точке C: } k_2 = k_3 \text{ или } \frac{H}{D_0 + H} = \frac{H \cdot \operatorname{ctg} \alpha}{D_0 + H}.$$

Отсюда $\alpha = 45^\circ$, причем, не зависимо от величины геометрических параметров валков и полосы.

$$\text{В точке D: } k_1 = k_3 \text{ или } \frac{2H}{D_0} = \frac{H \cdot \operatorname{ctg} \alpha}{D_0 + H}.$$

Выполнив некоторые преобразования с учетом того, что $H = b \cdot \sin \alpha$, получаем окончательное тригонометрическое уравнение:

$$2 \sin \alpha + C \cdot \sin^2 \alpha = \cos \alpha,$$

где $C = 2b/D_0 = 1$ (при принятых значениях D_0 и b).

Его численное решение дает $\alpha = 22,7^\circ$. При изменении значений C от 2,0 до 0,25, что соответствует практике, угол α изменяется в диапазоне от $20,3^\circ$ до $25,4^\circ$. Это означает, что при подгибке полки от 0° до указанного диапазона углов скольжение на приводном коническом элементе меньше, чем на коническом ролике, а при подгибке от 0° до 45° на свободно вращающемся коническом элементе оно меньше, чем на коническом ролике. А при углах от 45° до 90° скольжение на коническом ролике меньше.

Таким образом, из рассмотренных вариантов конструкций неприводного инструмента наиболее эффективным является цилиндрический ролик.

Выводы. Впервые получены данные о величине и распределении скоростей при формовке полосы неприводным инструментом различной конструкции. Они могут быть использованы при дальнейшем развитии теории формовки, в частности, определения мощности процесса, а также при проектировании технологии и оборудования для изготовления профилей.

Литература: 1. Тришевский И. С. Теоретические основы процесса профилирования / И.С. Тришевский, М.Е. Докторов – М.: Металлургия, 1980. – 287 с. 2. Производство гнутых профилей (оборудование и технология) / [Тришевский И.С., Юрченко А.Б., Марьин В.С. и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 384 с. 3. Ахлестин А.В. О путях повышения качества тонкостенных гнутых профилей с покрытием / А.В. Ахлестин // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і в машинобудуванні. – Тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2004. – С. 614-619. 4. Чекмарев А.П. Гнутые профили проката / А.П. Чекмарев, В.Б. Калужский – М.: Металлургия, 1974. – 264 с. 5. Организация производства гнутых профилей для объектов энергетики / [Юрченко А.Б., Брыков К.С., Марьин В.С., Каширский С.А.] // Гнутые профили проката: Отрасл. сб. научн. тр. – Харьков: УКРНИИМЕТ, 1987. – С. 75-84. 6. Пивовар В.С. Пути снижения потерь на трение и повышение качества гнутых профилей / В.С. Пивовар // Восточно – Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – №1. – С. 27-32. 7. Брыков К.С. Разработка технологии и оборудования и организация производства профилей для сельскохозяйственного машиностроения / К.С. Брыков, А.Б. Юрченко, А.Н. Карасевич, Н.Л. Волковой // Теория и технология производства гнутых профилей проката: Отрасл. сб. научн. тр. – Харьков: УкрНИИМет, 1988. – С. 82-89. 8. Юрченко А.Б. Энергосиловые параметры профилирования в валках с одинаковыми основными диаметрами и со свободно вращающимися элементами / А.Б. Юрченко, Р.Ю. Дебердеев // Теория и технология производства гнутых профилей проката: Отрасл. сб. научн. тр. – Харьков: УкрНИИМет, 1988. – С. 31-36. 9. Кобыляков Д. А. Опытнo-промышленная прокатка швеллера №3 / Д. А. Кобыляков // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії. Темат. зб. наук. пр. – Краматорськ – Слов'янськ: ДДМА, 2000. - С. 58-62. 10. Бороденко В. Н. Экспериментальные исследования влияния технологических и геометрических параметров на усилие профилирования / В. Н. Бороденко, В. М. Королик, В. Ф. Гарбуз // Гнутые профили проката. Отрасл. сб. научн. тр. Вып. IV. – Харьков: УкрНИИМет, 1976. – С.33-37. 11. Ахлестин А. В. О влиянии сил трения на процесс валковой формовки профилей / А. В. Ахлестин // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Вип. 61. Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні. - Харків, 2007.- С. 67-72. 12. Ахлестин А. В. Методика определения формы и размеров поверхности контакта при моделировании процессов ОМД / А. В. Ахлестин, В. Н. Левченко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Темат. сб. наук. праць – Краматорськ: ДДМА, 2005. – С. 114 – 118.

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Павлов Е.В., канд. техн. наук, Павлов И.В., канд. техн. наук
(г. Курск, Россия)

Results of complex researches and tests of the electro-acoustic protection coatings subjected to laser processing are presented. Substantial increase of wear resistance, heat resistance and corrosion firmness of coatings after laser processing has been established.

Для специальных изделий из жаропрочных никелевых сплавов, работающих в условиях высоких температур, коррозии, эрозии и износа, разработано и исследовано электроакустическое покрытие из сплава ЖСЗДК с добавками диспрозия и гафния [1, 2]. Однако недостатки, присущие электроакустическим покрытиям: гетерогенность структуры и состава, пористость, пониженная адгезионная связь на границе раздела покрытие – подложка, не позволили полностью реализовать ресурс работы полученной композиции. С целью локального улучшения защитных свойств нанесенных покрытий в наиболее напряженных участках изделия использовано лазерное оплавление защитного слоя на CO₂ – установках непрерывного действия: типа ЛГН – 702 с выходной мощностью 0,8 кВт и «Квант 16».

Плотность энергии излучения изменялась от 1 до 6 Дж/мм² при длительности импульсов 4×10^{-3} с. Для увеличения способности поглощения материалом подложки (покрытия) лазерного излучения на образцы наносилось специальное поглощающее покрытие. В частности при диаметре пятна 2 – 2,5 мм и удельной энергии лазера не менее 10^8 Вт/см² получали расплавленные треки длиной до 1,3 – 1,5 см. При применении вышеуказанных установок и технологий энергетическая экспозиция поверхности колебалась от 46 – 48 Дж/см². Износостойкость исследовали на машине торцевого трения при истирании образцов пальчикового типа. Кроме того, для испытаний использовалась машина трения 2070 СМТ – 1, на которой реализована схема трения диск – колодка. Величина износа определялась с помощью профилографа-профилометра модели 252 от искусственной базы, которой служила предварительно проточенная канавка. Испытания проводились в индустриальном масле. Контртелом являлся образец с покрытием, обработанный лазером. Скорость скольжения составляла 6 м/с при контактном давлении 10 МПа.

На подложку (цилиндрические валики) из сплава ЖС6У наносилось электроакустическое покрытие из сплава ЖСЗДК с малыми добавками диспрозия и гафния на установке ЭЛАН – 3. Для контроля свойств 2...5 деталей валиков разрезали по образующей цилиндра параллельно и перпендикулярно направлениям обработки.

Оптимизированный технологический режим электроакустического напыления [3] обеспечивал максимальную эрозию электрода с достаточной жаропрочностью [3]. Толщина покрытий составляла 50 – 200 мкм. Последующая лазерная обработка с плотностью мощности излучения составляла 130 МВт/м².

Скорости обработки при этом изменяли от 5 до 15 мм/с. После лазерной обработки с меняющейся скоростью (не более 5 мм/с) получали единичные дорожки с оплавлением поверхности. Обнаружено, что на поверхности появлялась оплавленная зона, имеющая дендритное строение с осями дендритов первого порядка в направлении теплоотвода, что согласуется с данными работы [4].

Металлографический анализ нанесенных покрытий до и после обработки лазером, который проводился на микроскопе МИМ – 8, выявил резкое различие в микроструктурах.

Для электроакустического покрытия, как и для всех других (электроискровых, плазменных и детонационных) характерна сложная слоистая структура с темно-серыми и светлыми фазами с включениями, имеющими разный объем и форму (рис. 1).

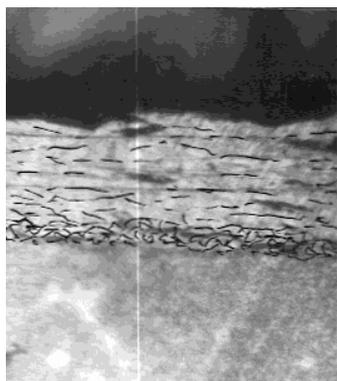


Рис. 1. Электроакустическое покрытие из сплава ЖСЗДК с добавками диспрозия и гафния на подложке из сплава ЖС6У ($\times 500$).

В месте контакта покрытия с основой наблюдаются отслоения и трещины. После лазерной обработки структура значительно изменяется – наблюдается частичное расплавление подложки и практически полное расплавление самого покрытия, а также происходит формирование нового состава поверхностного слоя.

В работах [5, 6] авторы считают, что в основе процесса переноса металла покрытия при оплавлении непрерывным лазером лежит циркуляционное движение и перемешивание расплава за счет термокапиллярного эффекта. Как показывает эксперимент, глубина расплавленной зоны (микрообъем расплавленного металла) определяется величиной вводимой мощности, что позволяет регулировать скорость охлаждения формирующегося покрытия. При подводимой максимальной мощности 2 кВт непрерывного CO_2 – лазера наблюдалась наибольшая глубина проплавления, достигавшая 1,6 – 1,65 мм. Такой режим вызывает формирование разнотельной структуры. Уменьшение вводимой мощности до 1 кВт соответствует увеличению скорости охлаждения. При этом формируется мелкокристаллическая структура с разным видом упрочняющих фаз. При мощности лазерного излучения 1,5 кВт получающаяся структура более дисперсна, чем при мощности 2 кВт. При уменьшении вводимой мощности до 1 кВт глубина расплавленной зоны уменьшается до 0,52 – 0,55 мм.

Результаты испытаний оплавленных лазером поверхностей электроакустических покрытий подтвердили повышение их износостойкости.

При различных схемах трения получено хорошее совпадение результатов, что свидетельствует о схожести процессов, протекающих в зоне контакта. Полученные результаты сравнительной износостойкости материалов при различных вариантах упрочнения – восстановления показывают, что при вышеуказанных режимах оплавление покрытий лазерным излучением обеспечивает повышение износостойкости в 1,3 – 2 раза по сравнению с оплавлением газовой горелкой; малые добавки в никелевый сплав диспрозия и гафния приводят к до-

полнительному увеличению износостойкости в 2 – 3 раза.

Увеличение износостойкости оплавленных лазерным излучением покрытий обусловлено спецификой этого вида обработки. Термическая обработка покрытия производится движущимся сфокусированным лучом диаметром 1 – 3 мм с высокой плотностью мощности порядка $10^5 - 10^6$ Вт/см². В таких условиях время термического воздействия на каждую микрону покрытия составляет 0,2 – 1 с. За это время происходит полный термический цикл процесса: нагрев микрону до температуры плавления; образование ванны расплава и перегрев её сопровождающийся интенсивным перемешиванием; кристаллизация расплава после прекращения воздействия излучения и охлаждения зоны обработки за счет теплоотвода в массу детали. Скорости нагрева и охлаждения достигают $10^3 - 10^6$ К/с. Описанный вид обработки приводит к формированию вышеописанной характерной структуры, обладающий рядом особенностей по сравнению со структурой, образующейся при традиционных видах оплавления – газопламенном и печном. К ним относится высокая степень измельченности структуры, однородность распределения интерметаллидности карбидной составляющей по всему объему, что повышает стабильность физико–механических свойств покрытия и уменьшает соответственно количество очагов разрушения. Большое количество границ раздела в мелкодисперсной структуре препятствует движению и скоплению дислокаций, их смыканию и возникновению полостей, а впоследствии – трещин и частиц износа. Это способствует локализации усталостного разрушения в меньших объемах и снижению интенсивности изнашивания при трении.

Рентгеноструктурным анализом установлено, что качественного изменения фазового состава при лазерной обработке не происходит. Изменяются лишь соотношения интенсивностей линий различных фаз. Соотношение фаз в сплаве после лазерной обработки зависит от режимов обработки. Лазерная обработка литых жаропрочных никелевых сплавов и плазменных покрытий из сплавов аналогов /5/, приводящая к расплавлению поверхностного слоя образцов, существенно изменяет условия охлаждения и кристаллизации в оплавленной зоне. Так, лазерное расплавление приводит к уменьшению размеров дендритов на 2 – 3 порядка, что соответствует скорости охлаждения расплава $10^5 - 10^6$ К/с. Дендриты меняют направление роста от перпендикулярного к дну оплавленной ванны до параллельного направлению сканирования лазерного луча, что объясняется возрастанием компоненты градиента температуры вблизи поверхности жидкой ванны в данном направлении. Лазерное оплавление сплавов приводит к многократному измельчению практически всех элементов структуры, включая первичные карбиды MeC, $\gamma+\gamma'$ эвтектику и γ – матрицу. Лазерное расплавление подавляет выделение междендритной карбидной эвтектики. Микрорентгеноспектральное исследование распределения легирующих элементов в зоне расплавления показало значительное снижение химической неоднородности внутри дендритной ячейки. Согласно выполненным термодинамическим расчетам в состав сплава покрытия должно входить небольшое количество карбида хрома (Cr_7C_3), линии которого вследствие их перекрытия с линиями других фаз, а также мелкодисперсности частиц (10 мкм) не были выявлены. Для покрытий, получаемых при

лазерном переплаве, характерно значительное повышение степени легированности γ -твердого раствора никеля, сопровождающееся возрастанием концентрации дефектов (дислокаций), созданием вокруг них полей упругих напряжений, что приводит к искажению кристаллической решетки и соответственно к упрочнению. Об этом свидетельствует сдвиг основных линий никеля в сторону меньших углов и изменение их физической ширины. При формировании упрочненного слоя имеет место текстурирование никелевых зерен в направлении отвода тепла, ориентированных по более плотноупакованным плоскостям $\langle 111 \rangle$. Структуры такого типа обладают пониженной склонностью к схватыванию при трении, что и было подтверждено электронно-микроскопическими исследованиями поверхностей износа. Результаты этих исследований показывают, что процесс изнашивания покрытия включает в себя усталостное изнашивание более мягкой составляющей – никелевой фазы, обнажение более твердых составляющих – первичных интерметаллидных и карбидных фаз – и их последующее выкрашивание.

Количество упрочняющей фазы и степень упрочнения матрицы определяют в совокупности сопротивление усталостному разрушению покрытия при трении. Введение различных добавок обуславливает различие в протекании процесса изнашивания вследствие разного влияния на никелевую матрицу и на интерметаллидную γ' - и карбидную фазы. Анализ поверхности износа покрытий, оплавленных излучением лазера, показал, что при трении композита из сплава без легирующих добавок на изнашиваемой поверхности наблюдаются развитые следы царапания продуктами усталостного разрушения. При трении покрытий с добавками количество этих следов на поверхности уменьшается. Наименьшая повреждаемость поверхности наблюдается у покрытий из сплавов с добавками диспрозия и гафния.

Структурные исследования показали, что при трении покрытия из сплава без добавок не происходит заметных фазовых превращений в приповерхностных слоях покрытий. При лазерном оплавлении в процессе трения практически не изменяются параметры решетки никеля и размер кристаллитов. Это указывает на то, что превалирующими в этом случае являются процессы выщарапывания продуктами изнашивания мягкой матрицы γ -твердого раствора никеля. При этом степень пластического деформирования невелика. Таким образом, проведенные исследования изнашивания покрытий из никелевых сплавов и композиций на их основе показали следующее. На интенсивность и характер протекания процесса изнашивания оказывает влияние как характер структуры, определяемый способом оплавления покрытия, так и вид композиционной добавки. Упрочнение лазерным оплавлением обеспечивает повышение износостойкости за счет измельчения структуры, насыщения матрицы легирующими элементами, её текстурирования.

Лазерная обработка устраняет пористость и гетерогенность нанесенных составов, на границе раздела происходит сплавление материала покрытия с материалом подложки. Микротвердость оплавленного покрытия повысилась до 18000...20000 МПа. Рентгеновским методом определяли внутренние напряжения в поверхностном слое образцов до и после лазерной обработки; напряжения изменялись от растягивающих (~ 350 МПа) до сжимающих (~ 362 МПа).

Повышение качества защитного слоя положительно сказалось на его служебных свойствах. Испытания на жаростойкость в окислительной атмосфере при $T = 1100$ °С в течение 50 часов привело к разрушению электроакустического покрытия на 70 – 80%, оплавленное покрытие сохраняет свою работоспособность.

Коррозионные испытания в среде хлоридов и сульфидов натрия при $T = 950$ °С в течение 50 часов приводит к полной потере защитных свойств электроакустического покрытия, обработанное лучом лазера покрытие даже в течение 150 часов хорошо сопротивляется воздействию агрессивных сред.

Эрозионная стойкость оплавленных покрытий повысилась в 3 раза, что также свидетельствует о несомненном преимуществе структуры после лазерной обработки. Оптимальной обработкой покрытия, при которой обеспечиваются вышеприведенное повышение эксплуатационных свойств, является лазерное оплавление с шагом равным $2\pi/3$. Рассмотренный способ лазерной обработки рекомендуется для локального упрочнения турбинных лопаток с электроакустическими защитными покрытиями.

Литература: 1. Гадалов В.Н., Павлов И.В., Рошупкин В.М. Применение экологических композиционных покрытий для повышения стойкости деталей прессового оборудования. // Медико – экологические информационные технологии – 2001: Сб. материалов IV-ой международной научно-техн. конф. – Курск: КГТУ, 2001. – С. 292 – 296. 2. Разработка и исследование высокоэффективных электроакустических покрытий из жаропрочных сплавов типа ЖС с целью создания композиционных материалов многофункционального назначения. / В.Н. Гадалов, В.И. Серебровский, В.Б. Тригуб и др. // Материалы и упрочняющие технологии – 2001: Сб. публикаций IX-ой Российской научно-техн. конф. – Курск: КГТУ, 2001. – С. 51 – 59. 3. Гадалов В.Н., Афанасьев А.А., Бредихина О.А. Вопросы оптимизации технологического процесса нанесения экологических электроакустических покрытий. // Медико – экологические информационные технологии – 2003: Сб. материалов VI-ой международной научно-техн. конф. – Курск: КГТУ, 2003. – С. 249 – 254. 4. Гадалов В.Н., Рыжков Ф.Н., Позвонков А.Ф. Структура и свойства жаропрочных никелевых сплавов и плазменных покрытий после лазерной обработки // МИТОМ, 1990, №7 – С. 36 – 39. 5. О поверхностном легировании металлов с помощью непрерывного лазерного излучения / И.Б. Боровский, Д.Д. Городский, И.М. Шарфеев и др. // ФХОМ, 1984, №1 – С. 27 – 30. 6. Влияние лазерной обработки на структуру, состав и свойства литейных сплавов и плазменно-напыленных покрытий сложнолегированной системы никель – хром / В.Н. Гадалов, А.С. Бойцова, В.А. Зуев и др. // Ультразвук и термодинамические свойства веществ. Сб. трудов КГПУ. – Курск: КГПУ, 1997. – С. 121 – 132.

УДК 621.783

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Павлов Е.В., канд. техн. наук, **Павлов И.В.**, канд. техн. наук
(г. Курск, Россия)

Results of comparative researches and tests of influence of laser processing for a tension, wear resistance and fatigue durability of a material of a cranked shaft of diesel engines are presented.

Качество и надежность выпускаемых машин в значительной мере зависят от износостойкости поверхности детали. Существующие способы упрочнения поверхности: химико-термическая обработка, объемная закалка, закалка ТВЧ и

др. вызывают деформацию деталей и требуют дополнительных операций механической обработки.

Применение мощных лазеров для упрочнения – принципиально новое направление в технологии упрочнения деталей. Для обработки могут быть использованы лазеры различных систем, но оптимальными для всех видов упрочнения считают непрерывные CO₂ – лазеры [1]. Мощный лазерный луч, обеспечивающий высокую производительность процесса, может конкурировать с индукционной закалкой.

При лазерном нагреве поверхности из высокопрочного чугуна на установке типа ЛГН-702 с выходной мощностью 0,8 кВт до 1000 – 1150 °С на глубине 0,25 – 0,3 мм температура слоя составляет 815 – 820 °С. Вследствие малого объема нагретого участка теплота с большой скоростью передается в объем детали и при перемещении нагретого пятна по поверхности происходит закалка.

Нами разработан технологический процесс лазерного упрочнения шейки коленчатого вала дизельного двигателя, предусматривающий химическое обезжиривание, промывку перед фосфатированием, фосфатирование, промывку после фосфатирования, лазерную обработку.

Химическое обезжиривание деталей проводят в моющем растворе «Ламбomid-203» с концентрацией 25 – 35 г/л при температуре 80 – 100 °С в течение 10 – 15 мин с последующим ополаскиванием в синтетическом моющем средстве «Ламбomid-102». При последующей обработке отверстия масляных каналов в шейках коленчатого вала после мойки закрывают графитовыми пробками или сначала в отверстие набивают шнуровой асбест, затем подготавливают пасту из жидкого стекла (30%) и графита (70%) и ею зашпаклевывают масляные каналы до уровня поверхности шеек.

Процесс фосфатирования применяется для увеличения поглощающей способности лазерного излучения. Фосфатирование осуществляется следующим образом. Сначала в ванне приготавливается противозносный фосфатирующий концентрат КПФ-1 из расчета 110 – 120 г/л. Затем в подогретый до 90 – 95 °С раствор опускают детали на 10 – 15 минут, затем вынимают и дают выдержку для стекания раствора с детали. После этого коленчатый вал промывают в проточной воде и подсушивают, после чего он готов к лазерному упрочнению.

Лазерная термическая обработка выполняется в следующей последовательности. Устанавливают коленчатый вал во вращатель с использованием центровместителей для осуществления вращения относительно оси упрочняемой шейки коленчатого вала. В зависимости от диаметра шейки коленчатого вала по таблице 1 необходимо установить технологический режим обработки; а именно частоту вращения детали и скорость подачи оптической системы. Облучение шейки коленчатых валов проводилось с 50% заполнением поверхности на глубину до 1 мм.

Установлена значительная структурная неоднородность по объему лазерного воздействия, являющаяся результатом как неравномерности распределения температуры по ширине и глубине дорожки облучения, так и исходной неоднородности облучаемого чугуна с перлитно-ферритной структурой. Следствием обоих факторов является неоднородное распределение остаточных напряжений.

Таблица 1

Технологические режимы обработки деталей лазерными установками непрерывного действия типа ЛГН-702 при мощности излучения 800 Вт и диаметре пятна 2,5 – 3,0 мм

Диаметр обрабатываемой поверхности, мм	Скорость подачи оптической системы, см/мин	Частота вращения детали, мин ⁻¹
60	14...16	32
80	13...13,5	28
100	10...12	24
120	9...10	20
150	8...9	15
180	7...8	13,5...14
200	6...7	12...12,2

Внутренние (зональные) напряжения, характеристики субструктуры (плотность дислокаций – ρ ; микродеформацию – $\Delta a/a$; размер блоков мозаики – D_{hkl}) определялись рентгеновским методом по стандартным методикам [2]. Рентгеновскую съемку осуществляли на установке УРС-50ИМ в кобальтовом K_{α} - излучении.

Субструктурные превращения предопределяются физическими и структурными эффектами в результате термического воздействия, а также динамического влияния ударной волны. В таблице 2 представлены изменения основных параметров субструктуры и зональных напряжений в поверхностном слое образцов до и после лазерной обработки.

Таблица 2

Характеристики субструктуры до и после лазерной обработки (ЛО)

Вид поверхностного упрочнения	Плотность дислокаций $\rho \cdot 10^{12}$, см ⁻²	Размер блоков D_{hkl} , нм	Микродеформация $\Delta a/a \cdot 10^3$	Напряжения σ , МПа
1. До ЛО	1,8	50	3,1	+150
2. ЛО	0,8	45	1,2	-100 до +100
3. ЛО + алмазное выглаживание	0,4	50	0,8	-190

Анализ микроструктур поверхностных слоев показал, что лазерное воздействие формирует структуры домартенситного класса с невысокой (около 5 ГПа) микротвердостью. Введение финишного выглаживания искусственным алмазом АСПК и минералокерамикой ВОК-60 или ВОК-71 практически не изменяет микротвердость, однако оно значительно изменяет не только уровень, но и знак макронапряжений в поверхностном слое.

Анализ распределения остаточных напряжений в чугунах непосредственно после лазерно-термической обработки показал, что центральной зоне дорожки соответствуют максимальные сжимающие напряжения, на границе упрочненных зон с необлученными участками сжимающие напряжения переходят в растягивающие.

Также установлено, что при последующем алмазном выглаживании на поверхности в необлученных участках создаются сжимающие напряжения и повышается их уровень в зоне лазерного воздействия, что должно благоприятно сказываться на усталостной прочности.

Эксплуатационную эффективность формирующихся структур поверхностных слоев оценивали по стандартным испытаниям на износостойкость и усталостную прочность [3].

Сравнительные испытания на усталость коленчатого вала показали, что предел выносливости коленчатого вала с шейками, закаленными лазерно-термической обработкой находится на уровне неупрочненного вала.

Испытания на износ показали, что лазерное упрочнение обеспечивает высокую износостойкость коленчатого вала, в 3 – 3,5 раза превосходящую износостойкость неупрочненного серийного.

Таким образом, полученный комплекс экспериментальных данных подтверждает, что лазерная термическая обработка является эффективным способом упрочнения шеек коленчатых валов.

Литература: 1. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с. 2. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. Учебное пособие для вузов. 4-ое изд. – М.: МИСИС, 2002. – 360 с. 3. Гадалов В.Н., Колмыков В.И., Серебровская Л.Н. Лабораторный практикум по материаловедению. Учебное пособие для вузов. – Курск: КГСХА, 2003. – 204 с.

УДК 621.891

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕНИЯ И ПРИРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОРШНЕВЫХ СПЛАВОВ АЛ-25 И АК4-1

Олейник А.К., канд. техн. наук, Чуйкова Е.В., Нестеренко А.В.

(г. Харьков, Украина)

The friction coefficient of alloys AL-25 and AK4-1 is investigation during running-in and state work with iron of piston diesel engine type of D100 and D80 .

Тепловозные дизели типа Д100 оснащены поршнями из легированного поршневого чугуна СЧ ХНМД. Для новых двигателей типа Д80 использованы составные поршни с тронком из деформируемого сплава АК4-1. Совершенствование дизелей 10Д100 связано с необходимостью снижения потерь на трение и повышения механического к.п.д., что может быть достигнуто уменьшением инерционных масс и соответственно динамических нагрузок. В то же время улучшение характеристик работы дизелей Д80 по расходу масла и топлива может быть достигнуто за счет снижения тепловых зазоров в сопряжении гильза-поршень.

Жаропрочные деформируемые и литейные алюминиевые сплавы АК4-1 и АЛ-25 широко используются в двигателестроении для изготовления поршней различных двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Поршни ДВС относятся к наиболее нагруженным деталям. Их ресурс работы во многом определяет межремонтные ресурсы работы двигателей, а характеристики свойств материалов определяют возможность совершенствования и повышения их технико-

экологических параметров [1–3].

К основным характеристикам свойств материалов для изготовления поршней ДВС относятся жаропрочность, жаростойкость, усталостная и длительная прочность, коэффициент линейного расширения, тепло- и температуропроводность, а также показатели трибологических свойств. В настоящее время основные тенденции в развитии поршневого двигателестроения направлены на совершенствование рабочих процессов, повышение экономичности, конкурентоспособности выпускаемых двигателей и экологических показателей работы и производства [4]. Это требует разработки и реализации новых конструктивных решений, совершенствования технологий изготовления деталей и эксплуатации двигателей, а также разработки и использования новых материалов и улучшения их свойств за счет оптимизации технологических режимов обработки.

Алюминиевые поршни, в отличие от чугунных, имеют меньшие инерционные массы и лучшую теплопроводность, что обеспечивает снижение силовых нагрузок и температурных нагружений. Однако более высокие коэффициенты линейного расширения не позволяют при запуске двигателя, при переходных режимах обеспечивать необходимые тепловые зазоры в сопряжении с гильзой цилиндра. Это приводит к увеличению расхода топлива и масла, повышению дымности выхлопа, динамических нагрузок, шума и, в общем, ухудшает экологические показатели работы дизельных двигателей, что в настоящее время является одним из показателей их конкурентоспособности [5].

Высококремниевые литейные силумины, к которым относится сплав АЛ-25, имеют относительно меньшие значения коэффициентов линейного расширения в сравнении с другими литейными и деформируемыми алюминиевыми сплавами [1,2]. Поэтому использование сплава АЛ-25 для изготовления поршней выпускаемых дизельных двигателей представляется целесообразным при их совершенствовании, с целью повышения технико-экономических и экологических показателей.

Целью работы является исследование изменения трибологических параметров – коэффициентов трения и эффективности приработки и задиростойкости литейного алюминиевого сплава АЛ-25 в сравнении со сплавом АК4-1 и высоколегированным чугуном СЧ ХНМД, используемыми для поршней выпускаемых дизельных двигателей.

Для исследования триботехнических параметров – изменения коэффициента трения в зависимости от нагрузок, прирабатываемости и задиростойкости сплава АЛ-25 в сравнении с используемыми материалами для изготовления поршней выпускаемых дизельных двигателей проведены испытания образцов сплава АЛ-25, изготовленных из заготовки поршня, полученной методом жидкой штамповки при удельном давлении 50 МПа с водяным охлаждением прессформы. Для сравнительной оценки испытывали образцы, изготовленные из тронка поршня дизеля Д80 (сплав АК4-1), и из юбки поршня дизеля 10Д100 (чугун СЧ ХНМД). Образцы вырезали из поршней с сохранением их рабочих поверхностей и используемых антифрикционных и прирабочных покрытий. Для тронков поршней дизеля Д80 используется твердосмазочное покрытие

ВАП-2 на основе дисульфида молибдена с эпоксидным связующим, для поршней дизеля 10Д100 – композиционное электролитическое покрытие Sn-Bi-Cu.

Химический состав исследованных сплавов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав исследованных алюминиевых сплавов

Алюминиевый поршневой сплав	Основные компоненты, % вес.						
	Si	Cu	Mg	Ni	Fe	Mn	Ti
АЛ-25	11,3	1,9	0,8	0,8	0,6	0,4	0,1
АК4-1	0,30	1,9	1,4	0,9	1,3	0,3	0,1

Испытания проведены на машине трения 2070 СМТ-1 при скорости скольжения 1,3 м/с. Нагружение осуществляли ступенчато по 0,2 кН с интервалом 75 с. На каждой ступени определяли значения коэффициентов трения. Нагрузку задиробразования определяли по резкому возрастанию момента трения. Смазку осуществляли маслом М14В₂. Образцы поршневых сплавов изготавливали в виде «колодок» с размерами в плане 10x10 мм. Контртелом являлись образцы из гильзового чугуна в виде «дисков» диаметром 50 мм и высотой 12 мм. Результаты испытаний по определению коэффициентов трения представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний по определению коэффициентов трения ($f_{тр}$)

Материал поршня (№испытания)	Значения $f_{тр}$ при нагрузке P, кН						
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
АЛ-25 (1)	0,070	0,060	0,060	0,058	0,070	0,073	0,071
АЛ-25 (2)	0,010	0,010	0,010	0,008	0,009		
АК4-1 (1)	0,070	0,077	0,075	0,040	0,051	0,065	1*
АК4-1 (2)	0,030	0,015	0,014	0,012	0,012		
СЧ ХНМ (1)	0,060	0,060	0,056	0,048	0,114	1*	
СЧ ХНМ (2)	0,120	0,100	0,096	0,093	0,110		

1* – стрелками показаны моменты начала задиробразований.

Анализ полученных результатов показывает, что образец заготовки поршня из сплава АЛ-25 и образец поршня из сплава АК4-1 в не приработанном состоянии имеют примерно одинаковые значения коэффициентов трения в диапазоне нагрузок 0,2 – 1,2 кН.

При повышении нагрузки (P) до P=1,4 кН для сплава АК4-1 и до P=1,2 кН при испытании образца из чугуна поршня момент трения резко возрастает, что может свидетельствовать о начале процессов схватывания и задиробразований. При этом также срабатывают защитные антифрикционные покрытия. Повторные испытания образцов при ступенчатом нагружении до P=1,0 кН проводили после разгрузки до 0,2 кН и приработке пар трения при этой нагрузке в течение 15 минут. Повторные испытания показали, что образцы из сплава АЛ-25 в приработанном состоянии имеют наименьшие значения коэффициентов трения.

Образцы из сплава АЛ-25 испытывались без приработочного и антифрикционного покрытий. Поэтому на основании полученных результатов мож-

но сделать вывод о том, что использование этого сплава, взамен существующих, приведет к повышению задиростойкости сопряжения гильза – поршень дизельных двигателей.

Литейный алюминиевый сплав АЛ-25 в отличие от деформируемого АК4-1 имеет меньшее значение коэффициента теплового расширения и лучшие показатели прочности при повышенных температурах, характерных для условий работы поршней высокофорсированных дизельных двигателей [1,2]. Поэтому, как для двигателей типа Д100, так и типа Д80, при необходимом повышении их технико-экономических показателей, целесообразно использование литейных алюминиевых сплавов на основе силуминов.

В настоящей работе рассмотрены характеристики трения и изнашивания сплава АЛ-25 на основе эвтектического силумина, в последующем, возможно, будет необходима корректировка состава этого сплава с учетом необходимости повышения его механических, теплофизических и триботехнических характеристик. Предполагается, что это возможно реализовать без существенного изменения технологии, поэтому расширение использования сплава АЛ-25 для поршней выпускаемых двигателей в настоящее время является наиболее целесообразным.

Литература: 1. Захаров М.В., Захаров А.М. Жаропрочные сплавы. – М.: Металлургия, 1972. – 384 с. 2. Мальцев М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1970. – 364 с. 3. Трение, изнашивание и смазки. Справочник в 2-х кн. Кн.2 / Под ред. И.В. Крагельского и В.В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1979. – 358 с. 4. Насыров Р.А. Повышение надежности работы поршней тепловозных дизелей. – М.: Транспорт, 1972. – 216 с. 5. Чайнов Н.Ф. Проблемы и перспективы поршневого двигателестроения в России // Двигателестроение. – 2001, № 4. – С. 46-47.

УДК 669.620.187

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ШТАМПОВКИ ПОРШНЕЙ ФОРСИРОВАННЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Лобанов В.К., докт. техн. наук, **Чуйкова Е.В.**

(г. Харьков, Украина)

There is executed the work at the choice of optimum circuit of manufacturing of preparations of pistons energy - unit EA-10 and transport diesel engine 2DT and there is carried analysis of properties of piston alloys of preparations from an alloy out Al - 25 and AK4-1, processed on various technologies.

Поршни ДВС работают в условиях высокой тепловой и механической напряженности, к ним предъявляются повышенные требования по теплопроводности, статической, динамической и усталостной прочности, антифрикционным свойствам, износостойкости, коррозионной стойкости, а также по удельному весу и коэффициенту линейного расширения.

В настоящее время поршни изготавливаются в промышленности литьем в кокиль из литейных поршневых сплавов, горячей штамповкой деформируемых сплавов, реже применяют штамповку в жидкой фазе, литье под низким давлением и изотермическое прессование. Литье в кокиль – наиболее простой технологический процесс, позволяющий использовать поршневые сплавы с

низким коэффициентом линейного расширения (КЛР) и получать отливки сложной конфигурации. Однако кокильные поршневые заготовки имеют два существенных недостатка – невысокое качество (пористость в массивных частях) и низкий коэффициент использования металла (КИМ), обусловленный потерей большого количества металла в отходы литейного производства такие, как литниковая система и напуски от литейных уклонов. Заготовки, полученные горячей штамповкой деформируемых сплавов (как правило, АК4-1), отличаются высоким качеством, но деформируемые сплавы по сравнению с литейными имеют на 15-20% более высокие значения КЛР, а КИМ при горячей штамповке еще меньше, чем при литье в кокиль.

Штамповка поршней из расплава металла предпочтительнее, так как сочетает достоинства обоих вышеуказанных способов - позволяет получать бездефектные, плотные заготовки с мелкодисперстной структурой материала поршня (аналогично горячештампованным), и использовать литейные поршневые сплавы с низким КЛР, обеспечивающие высокие эксплуатационные свойства поршней, а также сокращение расхода материала.

Остальные из указанных способов получения поршневых заготовок обеспечивают высокое качество поршней, но отличаются большой сложностью технологического процесса, в особенности изотермическое прессование, и меньшим КИМ.

Для повышения качества поршней путем выбора материала и технологии изготовления исследованы свойства отливки поковок из сплава АЛ-25 и АК4-1, полученных штамповкой жидкого металла и прессованных заготовок. Выполнена работа по выбору оптимальной технологии изготовления заготовок поршней энергоагрегата ЭА-10 и транспортного дизеля 2ДТ незначительно отличающихся по геометрическим параметрам, но работающих в различных условиях тепловой напряженности. Рабочая температура головки поршня энергоагрегата составляет 190-210°C, а двигателя 2ДТ – 260-280°C.

Технология изготовления поршней энергоагрегата предусматривает горячую штамповку поковок из алюминиевого сплава АК4-1 в открытом штампе [1]. Штампованные заготовки подвергали закалке в воду от температуры 530±5°C и последующему старению при температуре 180±5°C в течение 14 ч.

Изучение свойств сплава АК4-1 исследуемой плавки на образцах, вырезанных из поршня, свидетельствует, что принятая технология обеспечивает высокие значения механических характеристик материала тронка: $\sigma_b = 450$ МПа, $\sigma_{0,2} = 350$ МПа, $\delta = 14\%$, НВ 136-138.

Испытание поршней на одноцилиндровых отсеках и развернутых изделиях показало их удовлетворительную работоспособность. Однако поршни двигателя 2ДТ, изготовленные по приведенной технологии, оказались неработоспособными. Сплав АК4-1 значительно разупрочнялся, полость под кольцедержатель разбивалась, что сопровождалось прорывом газов в картер двигателя. В этой связи было предложено изготавливать заготовки поршня двигателя 2ДТ из алюминиевого сплава АЛ25, отличающегося от сплава АК4-1 повышенной теплостойкостью [2]. Заготовки поршней из этого сплава изготавливали

штамповкой жидкого металла (расплава) на гидравлическом прессе в пресс-форме с использованием принципа поршневого прессования [3].

Полученные заготовки поршней из сплава АЛ-25 термообработывали по режиму: закалка в горячую воду после выдержки в течение 3 ч при 495°C; старение при 195°C с выдержкой в течение 6 ч, охлаждение на воздухе.

Химический состав сплавов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сплавов

Сплав	Основные компоненты, % вес.							Примеси, % вес.		Основа
	Si	Cu	Mg	Ni	Fe	Mn	Ti	n	r	
АК4-1	0,5-1,2	1,9-3,5	1,4-1,8	0,8-1,3	0,8-1,3	-	0,1	0,3	-	Al
АЛ-25	11-13	1,5-3,0	0,8-1,5	0,8-1,3	-	0,3-0,6	0,05-0,2	0,2	0,2	Al

Механические свойства образцов из сплавов АК4-1 и АЛ-25, термообработанных на заданную твердость, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства сплава АК4-1 и АЛ-25

Сплав, способ изготовления поршней	Температура испытания, °С	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Твердость		
					Кратковременная твердость ($\tau=30$ с)	Длительная твердость ($\tau=1$ час)	При $t=20^\circ\text{C}$ после различных температур испытания
АК4-1, горячая штамповка	20	450	350	14,2	136-138	136-135	
	100	430	350	14,8	124-126	120-119	135
	200	360	325	9,6	118-116	110-108	135
	300	155	150	12,0	55-54	20-19	107
	400	40	38	32,4	20-19	9-8	66
АЛ-25, жидкого сплава	20	250	215	1,2	107-104	101-99	
	100	220	195	1,2	94-96	85-83	102
	200	190	180	2,0	79	59-58	96
	300	130	120	4,0	50-48	32-30	93
	400	50	40	9,6	26	16-13	87

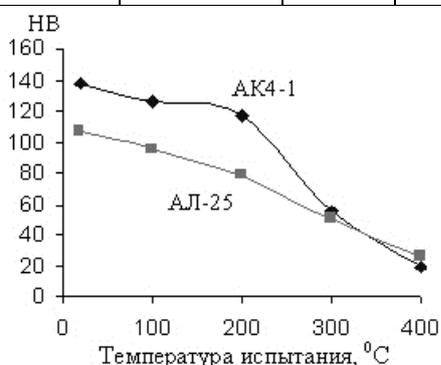


Рис. 1. Влияние температуры испытаний на кратковременную твердость

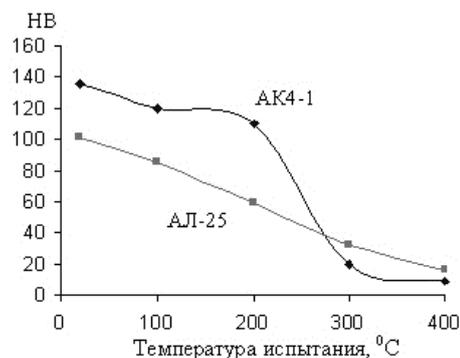


Рис. 2. Влияние температуры испытаний на длительную твердость.

На рис. 1 и рис. 2 представлены зависимости значений длительной ($\tau=1$ час) и кратковременной ($\tau=30$ с) твердости от температуры испытаний.

Установлено, что образцы из сплава АК4-1 при температуре испытания от 20 до 200°C имеют достаточно высокие показатели как прочности, так и пластичности по сравнению с соответствующими показателями образцов из сплава АЛ25. При дальнейшем увеличении температуры уровень механических свойств существенно снижается.

При испытании образцов сплавов АК4-1 и АЛ-25 установлено, что образцы с более высокой твердостью имеют повышенные значения временного сопротивления разрыву, предела текучести и относительного удлинения.

При температурах испытаний в интервале 200...300°C у всех образцов наблюдается незначительное повышение относительного удлинения. В диапазоне температур 300...400°C происходит резкое увеличение показателей пластичности с 12 до 32% для АК4-1 и с 4 до 9% для сплава АЛ-25.

Сравнительные исследования твердости образцов из сплавов АК4-1 и АЛ-25 показали, что с увеличением температуры испытаний резко снижается как длительная, так и кратковременная твердость материала. В интервале температур 200...300°C у образцов из сплава АК4-1 наблюдается резкое разупрочнение: длительная твердость снижается от 108...110 до 19...20 НВ, кратковременная – с 116...118 до 54...55 НВ. У образцов из сплава АЛ-25 твердость снижается в меньшей степени: длительная – от 58...59 до 30...32 НВ, кратковременная – от 79 до 48...50 НВ (рис. 1-2).

После испытаний повторно замерена твердость образцов при комнатной температуре и установлено, что при остывании (после нагрева до температуры испытания 350...400°C) твердость образцов из сплава АК4-1 ниже твердости образцов из сплава АЛ-25.

Проведенное исследование позволило разработать и реализовать в производственных условиях технологию изготовления жидкой штамповкой поршней двигателя 2ДТ на Харьковском ГП «Завод имени В.А. Малышева». Полученные поршни прошли все испытания и выдержали ресурс работы.

Выводы:

1. При рабочей температуре 200...250°C более высокими механическими характеристиками обладают заготовки поршней, полученные горячей штамповкой из сплава АК4-1. Однако при нагреве до 300°C заготовки, полученные штамповкой жидкого металла из сплава АЛ25, меньше разупрочняются, чем заготовки из сплава АК4-1.
2. Поршни, работающие при температурах около 200°C, предпочтительнее изготавливать горячей штамповкой из сплава АК4-1, а поршни, работающие при температурах, близких к 300°C, – штамповкой жидкого металла из сплава АЛ-25.

Литература: 1. Лобанов В.К., Любченко А.П., Босин Е.Е., Костомаров А.Н., Косовцев А.Н. Биметаллические штампованные поршни для форсированных ДВС // Механiка та машинобудування, 2001, №1,2. 2. Сергеев П.С. Штамповка жидких цветных металлов и сплавов. Л.: Судпромгиз, 1957. 3. Батышев А.И. Совмещенные способы литья и прессования. – М.: Машиностроение, 1971.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ ДЕТАЛЯХ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ

Лобанов В. К., докт. техн. наук, Пашкова Г.И., канд. техн. наук
(г. Харьков, Украина)

The influence of various types of stabilizing process on properties of welding samples from low-carbon steels was studied. The effect of influence of vibration method with impulsive unloading using on remained stresses distribution (reduction then 1,3...2,3 as less) and geometrical stability of samples was showed.

Одной из важнейших задач машиностроения является стабилизация размеров сварных деталей. В большинстве случаев она решается путем высокого отпуска деталей (600...650°C), требующего значительных затрат природного газа. Поэтому в последнее время получили распространение методы стабилизации размеров деталей с помощью вибрационной обработки [1...3].

Чаще всего применяется вибрационная обработка с возбуждением в деталях вынужденных незатухающих колебаний определенной амплитуды. Это позволяет значительно снизить энергозатраты и трудоемкость при стабилизирующей обработке, однако связано, во-первых, с использованием вибраторов, создающих определенный уровень шума, что не всегда приемлемо, а, во-вторых, с необходимостью разработки для каждой конкретной детали основных параметров вибрационного воздействия (вида динамического напряженного состояния, необходимого уровня динамических напряжений и т.д.). Поэтому целесообразно было оценить эффективность способа виброобработки, основанного на возбуждении в детали свободных затухающих колебаний в результате практически мгновенного (импульсного) снятия приложенной заранее статической нагрузки (ВИР-метод) [4].

Целью настоящей работы являлось сравнительное исследование влияния различных видов стабилизирующей обработки на уровень остаточных напряжений в зоне шва и геометрическую стабильность сварных деталей.

В качестве объектов исследования были использованы модельные сварные образцы из сталей Ст.3 и 20.

Рассмотрены следующие варианты стабилизирующей обработки:

- 1) отпуск при температуре 650 ± 10 °C, 1,5 ч;
- 2) вибрационная обработка путем возбуждения вынужденных резонансных колебаний (ВРК-метод);
- 3) метод вибрации с применением импульсной разгрузки (ВИР-метод).

В качестве исходного принят вариант со сваркой без последующей обработки. Возбуждение вынужденных резонансных колебаний осуществляли с помощью установки модели 489Р, состоящей из подпружиненного вибростола с укрепленным на нем вибратором типа ИВ-98 и пульта управления, позволяющего изменять частоту вибровозбудителя от 20 до 100 Гц. Опытная установка для обработки ВИР-методом представляет собой специальное приспособление для импульсной разгрузки образцов, установленное на универсальную машину типа УМЭ-10ТМ. Приспособление состоит из нагружающего устройства, кото-

рое с помощью тарельчатых пружин и спускового механизма с большой скоростью отбрасывает пуансон от образца, в результате чего в освобожденном от статической нагрузки образце возникают свободные затухающие колебания.

Остаточные макронапряжения определяли на поверхности образцов рентгеновским $\sin^2\psi$ -методом на стационарном дифрактометре типа ДРОН-3 в излучении Cr-анода. Оценку геометрической стабильности образцов проводили по величине остаточной деформации (ΔL) после испытаний образцов при действии на них в течение 144 ч статической нагрузки равной 0,8 предела пропорциональности ($\sigma_{\text{пц}}$). Статистическую обработку полученных результатов осуществляли по стандартной методике [5]. Для оценки однородности распределения остаточных напряжений определяли среднее квадратическое отклонение от средних значений.

Таблица 1

Влияние различных стабилизирующих обработок на уровень остаточных напряжений в сварных образцах из стали 20

№ п/п	Вариант изготовления		Значения остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}$, МПа						
			Расстояние от края сварного шва, мм					Среднее значение $\sigma_{\text{ост}}$ вблизи сварного шва	Среднее квадратическое отклонение S
			Левая сторона		Центр шва	Правая сторона			
			2	1		1	2		
1	Отпуск	исходный	- 170	- 200	+ 100	- 250	- 180	- 200	35,6
		650±10°C, 1,5 ч	- 80	- 110	+ 40	- 90	- 78	- 89,5	14,6
2	Вибрационная обработка ВРК-методом при частоте 100 Гц	исходный	- 220	- 225	+ 180	- 200	- 210	213,75	11,1
		30 сек	- 120	- 100	+ 50	- 110	- 95	- 106,25	10,9
		900 сек	- 95	- 65	+ 85	- 145	- 75	- 95	35,6
3	Вибрационная обработка ВИР-методом, 5 циклов	исходный	- 260	- 220	+ 200	- 280	- 300	- 265	34,2
		0,6 кН*	- 250	- 200	+ 30	- 150	- 220	- 205	42,03
		1 кН*	- 220	- 210	+ 90	- 200	- 220	-212,5	9,6
		1,4 кН*	- 230	- 220	+ 55	- 210	- 270	- 232,5	26,3

* – величина начальной статической нагрузки

Результаты проведенных исследований представлены в табл. 1 и табл. 2. Поскольку для стали Ст.3 результаты качественно не отличались, в таблицах приведены усредненные данные для образцов из стали 20. Необходимо отметить, что значения остаточных напряжений образцов при обработке ВИР-методом приведены для оптимального числа циклов нагружения при различных значениях начального статического усилия (0,6 кН; 1,0 кН; 1,4 кН). Эти значения соответствуют напряжениям в зоне сварки равным $0,28\sigma_{\text{пц}}$; $0,45\sigma_{\text{пц}}$; $0,6\sigma_{\text{пц}}$. Предварительными исследованиями выявлено, что наиболее целесообразной является пятикратная обработка, так как при однократной обработке практически не происходит изменения величины остаточных напряжений, а увеличение количества циклов обработки до 10 приводит к некоторому росту значений остаточных напряжений по сравнению с пятикратной обработкой и вызывает увеличение неоднородности их распределения.

Влияние различных стабилизирующих обработок на величину остаточной деформации сварных образцов из стали 20

№ п/п	Вариант обработки	Величина остаточной деформации ΔL , мм
1	Сварка без последующей обработки (исходный)	0,51
2	Отпуск при 650 ± 10 °С, 1,5 ч	0,21
3	Вибрационная обработка ВРК-методом при частоте 100 Гц в течение 30 сек	0,19
4	Вибрационная обработка ВРК-методом при частоте 100 Гц в течение 900 сек	1,3
5	Вибрационная обработка ВИР-методом (1 кН, 5 циклов)	0,21

Анализ полученных результатов (см. табл. 1) свидетельствует о том, что отпуск при температуре 650 ± 10 °С приводит к снижению остаточных напряжений в 2,2 раза, существенно повышая при этом однородность их распределения, что подтверждается подсчетом выборочного среднеквадратического отклонения. Снижение остаточных напряжений при таком отпуске сопровождается некоторой остаточной деформацией образцов (см. табл. 2).

Из табл. 1 следует, что вибрационная обработка с помощью вынужденных незатухающих колебаний на резонансных режимах также понижает уровень остаточных напряжений в сравнении с исходным вариантом в 1,85-2,25 раза. При этом, судя по значениям S , виброобработка в течение 30 сек позволяет уменьшить неоднородность распределения остаточных напряжений. Увеличение времени ВРК-обработки до 900 сек приводит к существенному увеличению неоднородности распределения $\sigma_{ост}$.

Следует подчеркнуть, что длительная виброобработка в резонансном режиме при высоких значениях амплитуд напряжений ($0,5 \dots 0,7 \sigma_{шт}$) приводит к образованию в сварных швах микротрещин и даже к разрушению образцов. Кроме того, при такой обработке возникает значительная остаточная деформация (см. табл. 2). Таким образом, при использовании метода возбуждения вынужденных колебаний на резонансной частоте следует тщательно подбирать время обработки, чтобы избежать искусственного снижения долговечности детали в условиях последующей эксплуатации.

От таких недостатков свободен метод ВИР-обработки, позволяющий, с одной стороны, строго регулировать уровень напряжений путем задания величины начальной статической нагрузки, а с другой стороны, использовать минимальное количество циклов нагружения.

ВИР-обработка при всех исследованных режимах приводит к уменьшению значений остаточных напряжений вблизи сварного шва, однако наибольшая их однородность обеспечивается при значении начальной статической нагрузки 1,0 кН (см. табл. 1). Указанный вариант и является оптимальным.

Из приведенных в табл. 2 данных следует, что отпуск при 650 ± 10 °С,

виброобработка ВРК-методом в течение 30 сек и ВИР-обработка по оптимальному режиму приводят к практически одинаковой остаточной деформации, вдвое меньшей, чем у образцов после сварки. Это позволяет сделать вывод о высокой эффективности вибрационной обработки для стабилизации геометрии деталей. Таким образом, проведенное сравнительное исследование эффективности перечисленных стабилизирующих обработок показало, что все исследованные методы позволяют снизить остаточные макронапряжения в 1,3...2,3 раза, а также (при оптимальных режимах) обеспечивают уменьшение среднеквадратического отклонения величины напряжений, характеризующего неоднородность их распределения вблизи сварного шва, в 1,1...3,5 раза.

Показана примерно одинаковая эффективность исследованных методов стабилизации размеров образцов при воздействии на них длительного статического нагружения в упругой области. Установлено, что остаточные макронапряжения не являются единственным определяющим критерием вибрационной обработки, так как величина снижения и их абсолютные значения не связаны однозначно со стабильностью размеров образца или детали.

Варьированием основных параметров ВИР-обработки выявлено, что наиболее эффективным является режим, при котором сумма начальных динамических и остаточных напряжений примерно на 10% превышает предел пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$ при выбранной схеме нагружения. Причем для создания более однородного напряженного состояния число циклов обработки должно равняться 5. Следовательно, вибрационная обработка является эффективным способом снижения уровня остаточных напряжений в сварных деталях и стабилизации их геометрии, причем из двух исследованных способов более предпочтительным является ВИР-метод как более управляемый, менее энергоемкий и не требующий защиты от шума.

Литература: 1. Сагалевиц В.М., Завалишин М.Н., Нашивочников В.В. Устранение деформаций сварочных балочных конструкций вибрацией // Сварочное производство. – 1979. – № 9. – С. 28-32. 2. Шпеер Ф.З., Панов В.И. Вибрационная обработка крупногабаритных конструкций с целью уменьшения деформации и склонности к образованию трещин // Сварочное производство. – 1983. – № 5. – С. 13-15. 3. Дрыга А.И. Гибкий автоматизированный участок с виброкомплексом для обработки корпусных деталей // Станки и инструмент. – 1992. – № 3. – С. 2-3. 4. Способ снижения остаточных напряжений в деталях: А. с. № 637232 СССР / В.Г. Алешинский, В.Н. Киселев, В.Д. Пененко, В.А. Скаженик, М.Л. Туревский, Д.Я. Фурман. Опубл. 1978, Бюл. № 46. 5. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.

УДК 621.356

СПОСОБ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АККУМУЛЯТОРОВ

Данков В. В., Аксенова С. И., канд. тех. наук
(г. Харьков, Украина)

The new method of the storage - battery reducing service is suggested.

На основе результатов практической работы по эксплуатации и восстановлению аккумуляторных батарей (АБ) на разных объектах систем Минатом-энерго и Минтопэнерго Украины, предприятиях связи, транспорта, горнодобы-

вающих предприятиях, а также на основе данных научно-исследовательских работ, выполненных в лабораториях химических источников тока Днепропетровского, Луганского и Курского аккумуляторных заводов и на кафедре комплексов авиационного оборудования Харьковского университета воздушных сил Украины им. И. Кожедуба, разработан способ «восстановительного» обслуживания аккумуляторов в составе АБ любых типов [1,2]. Для обслуживания аккумуляторных батарей по предлагаемому способу используют импульсный заряд стабилизированным напряжением, величина которого ступенчато повышается с заданной скважностью. При этом алгоритм изменения величины силы зарядного тока предусматривает уменьшение интенсивности приращения (нарастания) величины силы тока заряда по мере увеличения ее абсолютной величины и достигаемой величины зарядного напряжения, а верхний предел допускаемой величины зарядного напряжения не превышает значения верхнего предела напряжения «урavnительного» заряда обслуживаемой АБ. Такое решение позволяет проводить восстановительное обслуживание без изъятия АБ из объекта ее штатного использования.

Непродолжительное (в течение ~ 2 час.) тестирование током разряда $\sim 0,2 C_{10}$ дает возможность получать информацию о необходимости проведения восстановительного обслуживания с одновременным определением пригодности данной АБ к дальнейшему использованию согласно штатному назначению.

Применение способа двухциклового «восстановительного» обслуживания АБ, в отличие от всех других применяемых в современной технике методов, обеспечивает минимизацию протекания процессов, приводящих к износу аккумуляторов и потере ими работоспособности, а именно:

- создаются условия протекания заряда, исключаящие обильное выделение газообразного водорода, потерю влаги электролитом, интенсивный разогрев и иные процессы электрокоррозионного износа элементов аккумуляторов;
- происходит растворение и преобразование в полностью заряженную активную массу накопившихся на пластинах электродов труднорастворимых продуктов разряда, в результате чего обеспечивается восстановление имеющихся в составе обслуживаемых АБ «отстающих» и «частично засульфатированных» аккумуляторов, в том числе не имеющих своих внешних полюсных «+» и «-» выводов;
- увеличивается объемная пористость активной массы, что ведет к повышению отдаваемой емкости каждого аккумулятора в составе АБ;
- устраняются имеющиеся разбежности величин характеристик аккумуляторов (зарядного напряжения) в составе АБ и предупреждается последующее интенсивное нарастание этих разбежностей.

Предлагаемый метод обслуживания дает возможность осуществлять качественное восстановление глубоко разряженных АБ.

Одноразовое применение способа «восстановительного» обслуживания позволяет повысить отдаваемую емкость аккумуляторов в составе АБ на 15...35% от номинальной. При регулярном применении данного способа (не

реже 1 раза в течение 3–4 месяцев) представляется возможным увеличить ресурс надежной работы обслуживаемых АБ в 1,25...1,3 раза в сравнении с ныне действующими нормами.

Возможность объективной оценки технического состояния однотипных АБ, в том числе новых герметизированных свинцово-кислотных аккумуляторных блоков производства различных фирм, позволяет решать проблему подбора в состав АБ аккумуляторных блоков с максимально близкими величинами характеристик. Следует отметить, что до сих пор не было предложено ни одного эффективного решения проблемы минимизации разбежности характеристик аккумуляторных блоков в составе АБ, хотя известно, что наличие разбежности характеристик весьма отрицательно сказывается на работоспособности и сроке службы АБ.

Для практического использования «восстановительного» метода обслуживания АБ различных типов предприятием ООО «APS», г. Харьков разработан и выпускается зарядно-разрядный модуль (АЗРМ) серии «Cyclone». В настоящее время разработаны алгоритмы для «восстановительного» обслуживания с помощью АЗРМ типа «Cyclone» стартерных и иных бортовых АБ различных наземных транспортных средств подвижности (автомобилей, электромобилей, сельхозтехники, колесных и гусеничных военных машин и другой спецтехники), самолетов и вертолетов, АБ, обслуживающих объекты газотранспортных предприятий, АБ бесперебойного электропитания средств связи и т.д. Применение АЗРМ типа «Cyclone» обеспечивает возможность компьютеризировать процессы управления «восстановительным» зарядом, тестирования технического состояния обслуживаемой АБ в текущем времени и т. д., а также позволяет фиксировать и хранить в электронном виде результаты измерения параметров, по которым оценивается состояние АБ и определяется ресурс надежной эксплуатации (вольт-амперная характеристика аккумулятора).

Литература: 1. Данков В.В. Патент України НО1М/44 № 18026А, 17.06.1997. Спосіб відновлювального обслуговування акумулятора у складі батареї. 2. Данков В.В. Спосіб зарядки акумулятора. Рішення інституту промислової власності про видачу патенту МПК 6НО1М/44, 07.06.2000.

УДК 671.791.5

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ТРАНСПОРТНО-ЗАГРУЗОЧНОЙ СИСТЕМЕ ВАРОЧНОГО КОТЛА ТИПА КАМЮР

Яковлева А.Г., аспирант, **Волков Г.П.**, канд. техн. наук,
Камель Г.И., докт. техн. наук (Запорожье, Украина)

Basic physical processes, what is going on in transport-load system of kier of type Kamyr during continuous exploitation during a year, are considered.

В своих работах Непинин Ю.Н. [1], в общих чертах сообщают о работе гидравлической транспортно-загрузочной системы (ТЗС). При этом не раскрываются основные физические процессы, которые происходят в гидравлической ТЗС варочного котла Камюр. В настоящее время в варочных котлах типа Камюр получают 85% товарной целлюлозы. Таких установок в мире более 500, в

России – 75, в Америке – 150. На Украине подобные установки эксплуатируются на Жидачевском и Херсонском ЦБК.

Основные требования, которые предъявляются к гидравлическим ТЗС является непрерывная в течении года загрузка древесной щепой варочного котла. Любые перерывы в работе на одни сутки и более приводят к появлению брака товарной целлюлозы и нарушению техпроцесса варки в варочном котле. Для стабильной работы варочного котла необходимо раскрыть основные физические процессы, которые происходят в гидравлической ТЗС при эксплуатации.

Анализ литературных источников показал на отсутствие анализа физических процессов происходящих в гидравлической ТЗС при эксплуатации.

Целью работы является описание основных физических процессов и основных конструктивных элементов, зная которые можно целенаправленно управлять и повышать надежную работу всей гидравлической ТЗС.

Для решения поставленных задач использовались действующие гидравлические ТЗС, работающие на Украине, России и Болгарии. Экспериментальный материал был собран на более чем 50 действующих установках производительностью 320, 500, 800, 1000, 1700 т/сутки на разных предприятиях.

1. Конструкция роторного питателя. Основным регулирующим органом гидравлической ТЗС варочного котла является питатель высокого давления (ПВД), представляющий собой коническую трибосистему и состоящую из двухсекционного конического (конусность 1:20) ротора, вращающегося в коническом корпусе. Преимущество конической трибосистемы: 1) равномерный износ трущихся конических поверхностей при эксплуатации; 2) наличие механизма присадки, который позволяет компенсировать зазор в роторном питателе, образованном при износе; 3) отсутствует необходимость в разборке и снятии с эксплуатации питателя после образования критического зазора.

2. Декомпозиция функций выполняемая рабочими коническими поверхностями роторного питателя. Корпус ПВД конической трибосистемы: 1) на загрузку и выгрузку гидросмеси используется 40% поверхностей. На окна загрузки приходится 25% всех поверхностей и они располагаются в вертикальной плоскости снизу (12,5%) и сверху корпуса (12,5%) дугового градуса). На окна выгрузки приходится 15% и они располагаются в горизонтальной плоскости по бокам корпуса справа (7,5% и слева 7,5%). Окна загрузки и выгрузки разделены (изолированы) 60% поверхностями, из которых (по часовой стрелке вращения ротора) между окнами загрузки и выгрузки по 17,5 %, а между окнами выгрузки и загрузки по 12,5%. Из них 10% дугового градуса используется для смягчения гидроударов или 5% на каждом участке примыкающим к окнам загрузки. Дуговой градус окон сквозных карманов больше на 3%, что обеспечивает стабильную выгрузку гидросмеси сквозных карманов, находящихся в горизонтальной плоскости.

Ротор ПВД конической трибосистемы: 1) окна сквозных карманов каждой секции смещены относительно окон сквозных карманов второй секции на 45° . На окне загрузки (выгрузки) приходится 42% (на каждое сквозное окно – 10,5%) на рабочие конические поверхности между окнами 50% (на одну рабо-

чую поверхность между окнами – 14,5%).

3. Выполнение роторным питателем запорных функций. (Надежная изоляция окон загрузки от окон выгрузки). При выходе из сопряжения окон сквозных карманов ротора с окнами загрузки корпуса до сопряжения сквозных карманов ротора с окнами выгрузки окна сквозных карманов ротора должны пройти (свободную) контрольную зону корпуса между окнами загрузки корпуса это достигается тем, что на окна корпуса между окнами приходится 12,5% и 17,5% площади, а на окна сквозных карманов ротора 10,5% - что обеспечивает выполнение надежных запорных функций. Дуговой градус между окнами загрузки и выгрузки в корпусе на 2° (19%) больше чем дуговой градус окон ротора.

4. Характеристика трасс перемещения щелочи, древесной щепы и гидросмеси в гидравлической трубопроводной ТЗС.

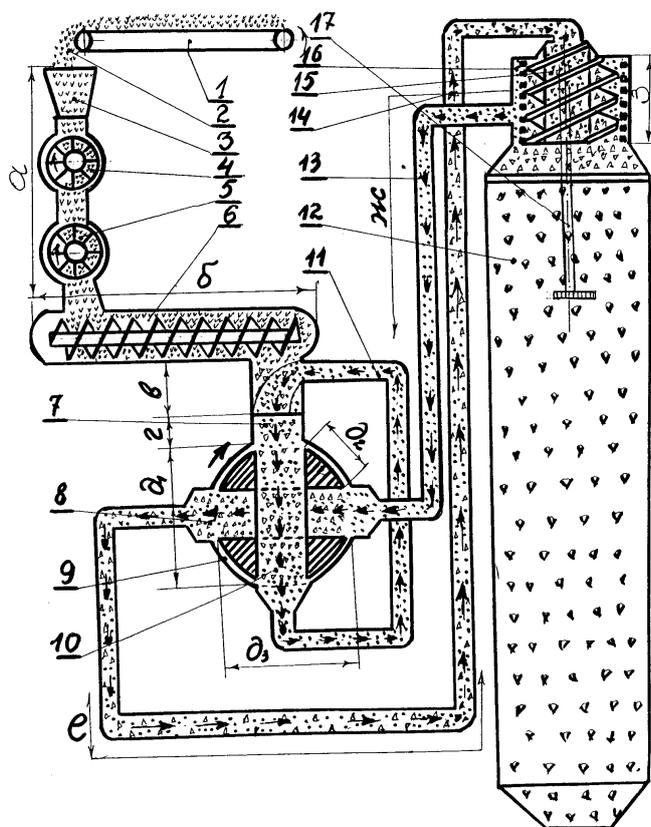


Рис. 1. Технологическая схема транспортно-загрузочной системы: 1 - конвейер; 2 - щепы; 3 - бункер; 4 - дозатор; 5 - ПНД; 6 - пропарочная камера; 7 - питательная труба; 8 - горизонтальный карман ПВД; 9 - корпус ПВД; 10 - вертикальный карман ПВД; 11 - труба возврата щелочи ПВД; 12 - котел; 13 - труба возврата щелочи ВД; 14 - труба загрузки гидросмеси котла; 15 - шнек; 16 - отбор щелочи; 17 - регулятор уровня щепы в котле; а, в, ..., ж - линейные размеры элементов установки. IV-й блок. Рост давления в кармане ротора. V-й блок. Сброс давления в кармане ротора.

си в гидравлической трубопроводной ТЗС. На рис. 1 приведена технологическая схема работы ТЗС. Она состоит из трех трасс: 1) механической трассы перемещения щепы, включающей ленточный конвейер; бункер, дозатор щепы. Питатель низкого давления (ПНД) и пропарочная камера; 2) трасса циркуляции щелочи низкого давления (ЦЩНД), включающая насос, трубопровод, питательную трубу подключенных к окнам корпуса в вертикальной плоскости и сквозных карманов, вращающегося ротора в вертикальной плоскости; 3) циркуляция щелочи высокого давления (ЦЩВД), включающая насос, трубопровод подключаемый к окнам корпуса в горизонтальной плоскости и верхней части варочного котла и 4) перемещение гидросмеси от питательной трубы. Окна корпуса и сквозные карманы ротора в вертикальной плоскости, окна корпуса и сквозные карманы ротора в горизонтальной плоскости, трубопровод и верхняя часть варочного котла.

5. Назначение трасс и обо-

рудование гидравлической ТЗС. Механическая трасса перемещения щепы предназначена для: 1) дозировки щепы в варочный котел; 2) подогрев и пропарка щепы и удаление из нее скипидара и других летучих соединений и 3) удаление из щепы металлических предметов (гвоздей, болтов и т.д.).

Трасса ЦЩНД предназначена для формирования гидросмеси и выравнивания ее концентрации в питательной трубе. Щепка из механической трассы попадает в зону действия трассы ЦЩНД. В питательной трубе встречаются два потока; щепы из пропарочной камеры и две струи щелочи из трассы ЦЩНД. При падении этих потоков к питательной трубе формируется гидросмесь с в питательной трубе 0,6 м и концентрация гидросмеси на выходе из питательной трубы около 30%, которые поступают в окна корпуса и карманы, вращающегося ротора в вертикальной плоскости. При этом концентрация щепы в гидросмеси возрастает с 30% до 90% в зависимости от кратности ЦЩНД, определяемой по формуле

$$n = \frac{Q}{V \cdot n}, \quad (1)$$

где $n = 2 \dots 5$ – кратность ЦЩНД; $Q = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ – производительность насоса; V – объем корпуса ротора, м^3 ; n – частота вращения ротора, мин^{-1} .

Трасса ЦЩВД предназначено для выталкивания гидросмеси концентрацией 90% из окон и сквозных карманов ротора в горизонтальной плоскости по трубопроводу в верхнюю часть варочного котла, где происходит увеличение концентрации гидросмеси с 30% до 90% с последующим отсосом через сита щелочи в трассу ЦЩВД. В зависимости от кратности ЦЩВД происходит изменение концентрации щепы в гидросмеси с 90% до 30%, и определяется по формуле (1).

Выводы

1. Гидравлическая трубопроводная транспортно-загрузочная система для загрузки древесной щепы должна состоять из трех трасс: 1) трасса механического перемещения и термической обработки щепы; 2) трасса циркуляции низкого давления – для формирования и выравнивания концентрации гидросмеси и загрузки ее в сквозные карманы ротора в вертикальной плоскости; 3) трасса циркуляции щелочи высокого давления для выталкивания гидросмеси из карманов ротора в горизонтальной плоскости и транспортировки ее в верхнюю часть варочного котла.

2. Для непрерывной, в течении года, подачи древесной щепы в варочный котел, находящийся под избыточным давлением 1,25 МПа необходимо использовать: 1) конический двухсекционный роторный питатель; 2) кольцевую трассу циркуляции щелочи низкого давления для загрузки щепы в карманы в вертикальной плоскости и 3) кольцевую трассу циркуляции щелочи высокого давления для выгрузки щепы из карманов ротора в горизонтальной плоскости в верхней части варочного котла.

3. Кольцевые трассы циркуляции щелочи низкого и высокого давления работают в автономном режиме и переключаются в сквозных карманах ротора в изолированном режиме.

4. Декомпозиция рабочих поверхностей ротора и корпуса осуществляется в таких соотношениях: ротор – окна загрузки – 25%, окна выгрузки – 15%, запор-

ные функции – 50% (12,5+12,5+12,5+12,5%) и 10% на смягчение гидравлических ударов в питателе при переходе карманов ротора в область высокого давления.

Литература: 1. Непинин Ю.Н. Технология целлюлозы/ Ю.Н. Непинин // Том.2. – М.: Гослесбумиздат, 1963. – 936 с. 2. Нечаев Г.И. Повышение надежности и продуктивности загрузочных устройств непрерывной варки целлюлозы и полуцеллюлозы / Монография / Г.И. Нечаев, Г.И. Камель. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2005. – 392 с.

УДК 621.18:66.096.5

МОЖЛИВОСТІ УПРАВЛІННЯ ЕФЕКТИВНІСТЮ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Воїнова С. О., канд. техн. наук, (м. Одеса, Україна)

The opportunities of control of the technical objects' efficiency are considered. Opportunities of control of the technical objects' efficiency.

Ефективність (Еф) технічного об'єкта (ТО) характеризує ступінь його досконалості. Еф - поняття комплексне. Його складові - соціальна Еф і технологічна Еф - також є комплексними поняттями. Становить значний інтерес аналіз технологічної Еф, її складових (рис. 1), головною серед яких є екологічна Еф - ЕлЕ. Першорядне значення придбало завдання керування нею.

Важкість зазначеного завдання обумовлена рядом наступних обставин:

- висока складність, найтісніший взаємозв'язок природних процесів, що визначають екологічну обстановку в глобальному масштабі й на місцях,
- мала вивченість зазначених процесів, що обмежує можливості впливу на стан природного середовища,
- малі доступні можливості впливу на стан природного середовища в умовах антропогенного діяння, що підсилюється, на нього,
- низька екологічна культура в побуті й на виробництві.

Встає питання: які є можливості вирішувати завдання управління ЕлЕ.

На ЕлЕ ТО впливає ряд чинників. По-перше, це чинники, що визначають екологічні можливості використовуваної в ТО технології. По-друге, це чинники,

що відбивають вплив екологічних можливостей самого ТО. По-третє, це чинники оперативного характеру, що відбивають вплив режимних умов функціонування ТО (рис. 1). Серед останніх важливою є роль навантаження об'єкта.

Викладене свідчить про те, що ЕлЕ ТО залежить від його екологічних можливостей, екологічних можливостей використовуваної технології й режиму його функціонування, що задає система автоматичного управління (САУ) [1-3].

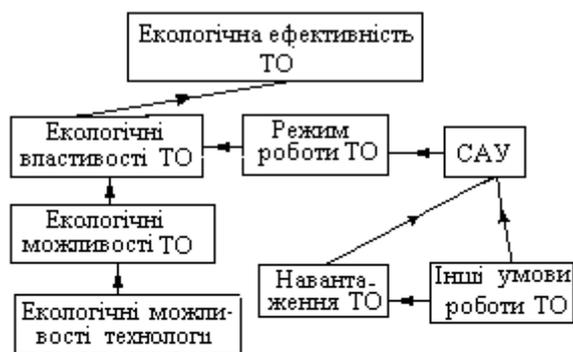


Рис 1 - Структурно-логічна схема взаємодії чинників, які впливають на екологічну ефективність ТО.

Наведена картина впливу розглянутих чинників на ЕЕ є характерною в загальному випадку, включаючи випадок впливу їх на формування технологічної ефективності ТО в цілому.

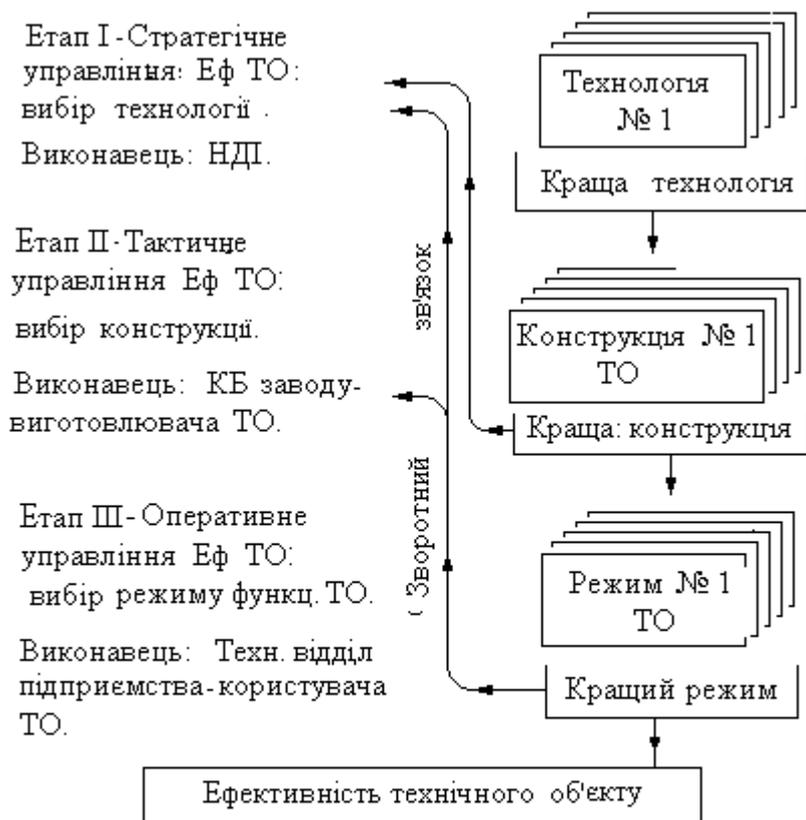


Рис. 2 - Структурно-логічна схема комплексного управління ефективністю технічного об'єкту.

конструкції ТО, з позицій пошуку кращого її варіанта. Завдання етапу виконують у конструкторському бюро заводу-виготовлювача.

- Етап III - оперативний: управління вибором режиму роботи ТО, пошук кращого його варіанта в кожний момент часу. Завдання етапу виконують у технічному відділі підприємства, що встановило створений ТО, вибирають кращий режим його роботи, потім за допомогою САУ реалізують його в процесі використання об'єкта, тобто вибирають такий режим роботи ТО, у якому його технологічні можливості реалізуються у вигляді його технологічних властивостей.

Таким чином, фактична технологічна Еф ТО, тобто ступінь реалізації його потенційних технологічних властивостей, визначається якістю процесу управління цим об'єктом.

Висновки.

- 1 Управління Еф ТО - комплексний процес, здійснюваний у три етапи: стратегічний, тактичний і оперативний.
- 2 Управління на всіх етапах носить організаційно-технічний і науково-технічний характер.

Становить інтерес аналіз механізму управління процесом формування ефективності ТО протягом усього періоду, від початку розробки ідеї створення ТО до закінчення його використання на виробництві. Цей період складається з наступних трьох етапів (рис. 2):

- Етап I – стратегічний: управління вибором технології виробничого процесу (що підлягає втіленню в створюваний ТО), з позицій пошуку кращого її варіанта. Завдання етапу виконують у головному галузевому науководослідному інституті.

- Етап II - тактичний: управління вибором

- 3 Еф працюючого ТО, тобто ступінь реалізації його потенційних технологічних властивостей, визначається якістю процесу управління цим об'єктом, здійснюваного САУ.
- 4 Високоякісно працююча САУ технологічні можливості ТО перетворює в його технологічні властивості, які стають доступними для практичного використання.

Література: 1. Воїнова С. О., Воїнов О. П. Автоматичне управління – інструмент реалізації потенційної технологічної ефективності технічних об'єктів. // Н.-т. сб-к кафедри «Тепловые эл. станции и энергосберегающие технологии» по энергосберегающим технологиям в теплоэнергетике.– Одесса, ОНПУ, 2007. - С. 19-22. 2. Воїнова С. О. Можливості управління екологічною характеристикою технічних об'єктів. // Физич. и компьютерн. технологии. // Тр. 11-ой Междунар. н.-т. конф. (02–03 июня 2005 г., Харьков). Харьков: ХНПК «ФЭД», 2005. – С. 221–223. 3. Воїнова С.А., Сычук Л.М. Пути непосредственного управления экологической эффективностью котельно-топочных систем // Наукові праці ОНАХТ/ Мін. освіти і науки України. – Одеса, 2007. – Вип. 31. – Т. 1. – С. 159-161.

УДК 621.18:66.096

ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ЗАДАЧІ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ ЕФЕКТИВНІСТЮ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Воїнова С.О., канд. техн. наук (м. Одеса, Україна)

Some features of a control's task by the technical objects' ecological efficiency are considered.

Стан навколишнього середовища (НС), особливо живої природи, вимагає рішучого підвищення екологічної ефективності (ЕлЕ) виробництва, кожного технічного об'єкта (ТО).

Ступінь досконалості ТО можна оцінювати різними показниками. Найбільш загальним і важливим серед них варто визнати його ЕлЕ. Ця обставина додала задачі управління ЕлЕ ТО пріоритетне положення серед задач управління складовими технологічного процесу, що протікає в об'єкті. Зазначена задача є неординарною за змістом, актуальною, складною й винятково цікавою.

До числа істотних особливостей згаданої задачі ставляться властивості системи, утвореної об'єктом управління - ТО - і його навколишнім природним середовищем, що включає живу природу й неживу природу. Антропогенний шкідливий вплив вражає обидві частини НС. Застосування систем автоматичного управління (САУ) ТО покликані забезпечити ведення режимів працюючих ТО по траєкторіях, які зводять до доступного мінімуму шкідливий вплив на НС. Традиційно цю задачу перед САУ не ставили, їй доручали задачу підтримки на заданому рівні економічної ефективності й загальнотехнічної ефективності (насамперед, високої надійності). Нинішнє, тяжке становище НС, особливо живої природи, змушує перейти до нової концепції управління виробничими об'єктами: перейти до прямого, безпосереднього управління їхньою ЕлЕ. САУ цього типу варто віднести до нового покоління засобів автоматизації.

При розробці задачі управління ЕлЕ ТО зіштовхуються з низкою складних, мало розроблених, досить специфічних питань; вони утворюють комплекс, що носить характер великої науково-технічної проблеми. Торкнемося

основних особливостей зазначеного комплексу.

Приведемо найбільш істотні із числа згаданих питань стосовно довільно обраного випадку впливу виробничого процесу на НС.

- Які складові (елементи, чинники) шкідливого впливу (ШВ) ТО на НС, включаючи (а це надзвичайно важливо!) нові, нехарактерні, нетрадиційні?
- Які механізм, результат і інтенсивність ШВ кожного чинника, у різних умовах реалізації; вплив на них цих умов, у тому числі динаміки впливу?
- Який характер (антагоністичний, адитивний, синергічний) спільного ШВ чинників у різних їхніх сполученнях, за різною їхньою силою й за різних умов?
- Який порівняльний результат ШВ різних з діючих чинників на кожний з об'єктів живої природи, що входять у кожний з розглянутих біоценозів?
- Як впливають на результат ШВ кожного чинника в різних умовах властивості організму, стать, вік, стан здоров'я, спадкоємні особливості, нервово напруження, умови життя й ін.?
- Як змінилися, внаслідок антропогенного ШВ, умови життя виду в межах минулого періоду, що піддається надійному науковому аналізу, як змінюються ці умови тепер?
- Як змінилися, внаслідок антропогенного ШВ, стан живих організмів кожного досліджуваного виду й відповідного біоценозу в цілому, як змінилася їхня піддатливість ШВ?
- Чи можна й, якщо так, то як, урятувати, зберегти тих представників живої природи, які виявилися в критичному стані?

Аналіз викладеного показує, що безліч чинників ШВ, об'єктів живої природи - мішеней ШВ, - умов впливу перших на других, все це сформувало гігантську безліч обставин, результатів ШВ на елементи живої природи.

Звертає на себе увагу той дивний факт, що виробнича діяльність людини створила, сформувала зазначену гігантську безліч сумних фактів гноблення й знищення живих організмів, більше того, продовжує цю "роботу" у зростаючому темпі. Разом з тим, об'єм наукових вишукувань екологічного характеру незрівнянно малий на фоні зазначеної гігантської безлічі обставин.

У підсумку, проглядається грандіозна за масштабом й важливістю, соціальна не в загальнолюдському, але в загальноприродному, планетарному відношенні проблема порятунку природного середовища, і насамперед, - живої природи. Дана проблема містить ряд основних, великих науково-технічних задач, кожна з яких складається з масиву окремих задач. Унікально широка масштабність проблеми робить доступною розробку лише деякої частини цих, окремих задач. Більшість із них, в абсолютному вираженні, представляє великі науково-технічні задачі, у тому числі - системного характеру. У їхньому числі становить істотний інтерес задача підвищення ЕлЕ ТО, шляхом прямого (безпосереднього) управління режимом їхньої роботи [1-3]. Ступінь вивченості проблеми, її елементів, як у статистиці, так і в динаміці, досить мала; вона не відповідає проблемі за значенням (актуальністю) і ступенем складності.

Екологічну ефективність ТО формує ряд чинників. Серед них провідну

роль грають його екологічні властивості й режим роботи.

Режим роботи ТО визначає САУ під дією сигналів, що відбивають умови його роботи, і відповідно до встановленого для неї алгоритму управління. Умови роботи представлені сигналами, що відбивають показники технологічного процесу, і, у першу чергу, показники ЕлЕ ТО. Регулятори САУ впливають на чинники, що визначають зазначені показники ЕлЕ ТО.

Важливо відзначити, що САУ ЕлЕ ТО не підмінює, а доповнює традиційну САУ технологічним процесом ТО. Однак, вона виконує головну задачу управління ТО. У САУ ЕлЕ ТО – системах нового покоління – варто застосовувати сучасне алгоритмічне й технічне забезпечення [4].

В області управління ЕлЕ ТО ускладнюючі обставини перебувають не в сфері теорії й практики автоматичного управління, вони перебувають у сфері постановки й технологічного принципового рішення конкретної задачі підтримки обраного параметра ЕлЕ об'єкта на заданому рівні із заздальгідь прийнятим рівнем статичної й динамічної помилок.

Є підстава затверджувати, що успіх майбутнього широкого освоєння прямого управління ЕлЕ ТО й темп його досягнення будуть визначатися, насамперед, відповідними успіхами в сфері створення технологій і ТО, здатних забезпечити високу ЕлЕ роботи при високій якості процесу управління.

Рішення задач розглянутої проблеми можливо за умови надання виконавцям необхідного ресурсного забезпечення. Рішення задач проблеми повинне опиратися на комплексно-системний підхід у всіх її ланках і на всіх етапах розробки.

У проблемі підвищення ЕлЕ виробництва істотне значення має рівень екологічної культури виробничого персоналу. Підвищення її рівня - неодмінна умова забезпечення належної ЕлЕ ТО [5].

Висновки.

1. Задача прямого управління ЕлЕ ТО характеризується гранично високим ступенем складності об'єкта управління, з одного боку, і малою вивченістю впливу на нього з боку виробничої діяльності людства, з іншої.
2. Необхідне розширення науково-дослідних вишукувань у сфері порятунку НС, у тому числі розробок по прямому управлінню ЕлЕ ТО.
3. САУ ТО дозволяє реалізувати його потенційну технологічну ефективність, у тому числі найважливішу її складову – ЕлЕ.
4. САУ режимом роботи ТО є найважливішою частиною його загальної системи управління.
5. Програма виконання комплексу робіт проблеми порятунку природного середовища повинна займати пріоритетне положення серед провідних науково-технічних і виробничих програм сучасності.

Література: 1. Воїнова С.О. Можливості управління екологічною характеристикою технічних об'єктів // Физические и компьютерные технологии. - Тр. 11-ой Междунар. н.-т. конф. (02-03 июня 2005 г.). - Харьков: ХНПК «ФЭД», 2005. - С. 221-223. 2. Воїнова С.А. Актуальные задачи управления экологической эффективностью технических объектов // Матер. Междунар. конф. «Стратегия качества в промышленности и образовании». (1–8 июня 2007 г., г. Варна, Болгария). - Днепропетровск – Варна: «Фортуна». – ТУ Варна.– 2007 г., Т. 1. – С.102-104. 3. Воїнова С.А., Сычук Л.М. Пути непосредственного управления экологической эффек-

тивностью котельно-топочных систем // Наукові праці ОНАХТ/ Мін. освіти і науки України. – Одеса, 2007. – Вип. 31. – Т. 1. – С. 159-161. 4. Хобин В.А. Системы гарантирующего управления технологическими агрегатами: основы теории, практика применения / Одесская национальная академия пищевых технологий. – Одесса: «ТЭС», 2008. – 306 с. 5. Воїнова С.О. Проблема підготовки для промисловості кадрів високої екологічної культури. – Матер. Междунар. н.-практ. конф. «Повыш. энергетич. ефективности пищевых и хим. производств» (4-7 июня 2007 г., Одесса). – Одесса: ОНАХТ, 2007. (Электрон. версия). – С. 153-154.

УДК 620.9.62-6

О ТОПЛИВЕ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК

Воинов А.П., докт. техн. наук, **Воинова С.А.**, канд. техн. наук
(г. Одеса, Украина)

The expediency of creation in Ukraine of the power steam-gas units on gas of the pirolis-process of coal is offered. About fuel for the power steam-gas units.

Как известно, перспективным путем развития стационарной энергетики является замена действующих ныне паротурбинных установок парогазовыми установками (ПГУ). Они позволяют поднять коэффициент полезного использования энергии топлива от современного уровня 35-49 % до уровня выше 50 % и более.

Особенностью ПГУ является применение газотурбинного и паротурбинного двигателей, технологически тесно взаимосвязанных в ее тепловой схеме. Первый получает энергию сжигаемого газообразного или жидкого топлива, второй – топлива любого вида, в том числе твердого.

Развитие стационарной энергетики Украины, как и энергетики других стран, ориентировано на сооружение ПГУ. Однако вопрос о топливной базе ПГУ усложнен рядом жестких условий, весьма существенных обстоятельств:

а) газотурбинные установки (ГТУ) приемлемо долговечны только при работе на газообразном или беззольном жидком топливе;

б) с учетом относительно скромных (по сравнению с запасами твердого топлива) разведанных запасов газообразного и жидкого топлива на территории Украины, с учетом растущей потребности в нем в транспортной энергетике и неэнергетических отраслях производства, а также с учетом ускоряющегося роста его цены на мировом рынке, приходится признать нецелесообразность применения газообразного и жидкого топлива в отечественных ПГУ будущего;

в) весьма крупные разведанные запасы твердого топлива на территории страны выдвинули условие: целесообразно развивать отечественную, прежде всего стационарную, энергетику на основе использования топлива этого вида.

Анализ изложенного убеждает в том, что единственным целесообразным и одновременно реально возможным следует признать применение ПГУ, газотурбинная часть которых будет работать на искусственном газообразном топливе, получаемом газификацией твердого топлива, а паротурбинная часть будет работать на твердом топливе. Это в полной мере будет соответствовать общей концепции развития структуры топливного баланса энергетики Украины [1]. Подобные – «твердотопливные» – ПГУ окажутся вне зоны влияния структуры топливного баланса отрасли, влияния ценообразования на рынке импор-

тируемых газообразного и жидкого топлива, позволят оздоровить указанную структуру.

Искусственное газообразное топливо получают при газификации натурального твердого топлива в процессе его пиролиза (пирогенетического разложения). При этом также получают твердую горючую часть (полукокс) и жидкую углеводородную составляющую – ценное химическое сырье.

Газ пиролиза (ГП) можно сжигать не только в камерах сгорания ГТУ, но и в других огнетехнических установках. Полукокс – ценное твердое топливо; его можно сжигать в котлах-утилизаторах ПГУ или в топках других котлов. Жидкий продукт пиролиза подлежит направлению в химическую промышленность; его также можно сжигать в топках котлов.

Известно несколько технологических схем пиролиза твердого топлива; некоторые из их числа освоены в производстве с высокой эффективностью. Все они относительно сложны, требуют высокой научно-технической и организационно-технической культуры в постановке, проведении и управлении процессом получения ГП.

Однако альтернативы рассматриваемому пути получения искусственного газообразного топлива нет. Важно отметить, что при широкомасштабном производстве, с учетом использования всех продуктов процесса пиролиза, цена получаемого ГП оказывается ниже цены природного газа. Поэтому создание отрасли производства ГП в составе топливно-энергетического комплекса может оказаться высокорентабельным. Количественная оценка указанных показателей должна опираться на комплексно-системный анализ производства ГП в конкретных условиях, с учетом его масштаба, уровня и динамики изменения цены используемых твердого топлива, энергии, расходных материалов, с учетом удельных капиталовложений, технического обслуживания установок пиролиза, цен на рынке труда, услуг, а также других факторов.

Отметим, что при разработке ПГУ необходимо применять новые высокоэффективные технологические решения в элементах, схемах и режимах работы оборудования. В частности, при создании ПГУ для сжигания твердого топлива пониженного качества целесообразно применение в котлах технологий низкотемпературного кипящего слоя, объемного охлаждения топочной среды, двухступенчатого сжигания. В создаваемых ПГУ необходимо применение оборудования, носящего черты нового поколения. Значительный интерес представляют новые разработки Харьковского турбогенераторного завода в области паровых турбин и разработки Николаевского завода «Заря» в области газовых турбин. Котельное оборудование можно производить на Монастырищенском заводе «ТЕКОМ», предприятиях Харькова, судостроительных заводах Николаева.

Существующий научно-технический потенциал и накопленный задел можно продуктивно использовать в программе создания ПГУ разной единичной мощности. При этом, целесообразно создавать на твердом топливе ПГУ большой единичной мощности и, частично, установки средней мощности. Часть ПГУ средней и все установки малой мощности, их ГТУ следует оставить на природном газе и жидком топливе, т.к. обеспечение их ГП сложно, по крайней мере в первый пери-

од освоения производства и средств распределения ГП по потребителям.

Необходимо применять системы автоматического управления (САУ), способные обеспечить реальную технологическую эффективность работы оборудования ПГУ, близкую ее потенциальному уровню. Это прежде всего относится к обеспечению доступного предельно высокого уровня экологической эффективности оборудования ПГУ. Особый интерес представляют САУ прямого управления экологической эффективностью ПГУ. Системам данного назначения необходимо современное алгоритмическое и техническое обеспечение [2, 3].

Создание и использование новых ПГУ, подготовка топлива для них, оценка показателей функционирования систем и отдельных их элементов должны отвечать возросшему уровню научно-технической культуры в отрасли.

В ВУЗах целесообразно по ускоренной программе выпускать специалистов химиков и энергетиков по профилю термической переработки твердого топлива.

Задачи программы создания ПГУ на твердом топливе соответствуют проблематике институтов НАН Украины, в частности, ИТТФ и ИПМ, тематике научно-исследовательских работ отраслевых НИИ, ВУЗов и факультетов энергетического профиля. Научный потенциал действующих специалистов позволяет решить комплекс задач создания отечественных ПГУ на твердом топливе в ограниченные сроки.

Выводы.

1. Надлежащее обеспечение топливом создаваемых ПГУ является важной и сложной научно-технической и научно-организационной проблемой государственного значения.
2. В нынешних условиях и в видимой перспективе единственно целесообразным является отечественные ПГУ высокой и средней мощности создавать на основе использования твердого топлива.
3. В газотурбинных установках создаваемых ПГУ целесообразно применять газ пиролиза твердого топлива.
4. Для получения газа пиролиза твердого топлива, необходимо осуществить научно-техническую и научно-организационную программу создания в топливно-энергетическом комплексе производственных мощностей для термохимической переработки твердого топлива и получения искусственного газообразного топлива.
5. В программе создания ПГУ на твердом топливе должны быть использованы новейшие высокоэффективные технологические, конструкторские и режимные решения в области энергетики.

Литература: 1. Воинов А. П. Проблематика использования низкокачественного твердого топлива в котельных установках. – Матер. Междунар. конф. „Стратегия качества в промышленности и образовании”. (1-8 июня 2007 г., Варна, Болгария). – Днепропетровск–Варна: „Форум”, ТУ Варна.– 2007 г., Т. 1. – С. 105-106. 2. Воинова С.А. Актуальные задачи управления экологической эффективностью технических объектов. – Матер. Междунар. конф. «Стратегия качества в промышленности и образовании». (1–8 июня 2007 г., г. Варна, Болгария). – Днепропетровск – Варна: «Фортуна». – ТУ Варна. – 2007 г., Т. 1. – С. 102-104. 3. Воинова С.А., Сычук Л.М. Пути непосредственного управления экологической эффективностью котельно-топочных систем // Наукові праці ОНАХТ / Мін. освіти і науки України. – Одеса, 2007. – Вип. 31. – Т. 1. – С. 159-161.

УДК 621.181:66.096.5

ПРОБЛЕМАТИКА РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ КОТЕЛЬНО-ТОПОЧНОГО НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПУЗЫРЬКОВОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ

Воинов А. П., докт. техн. наук, (г. Одесса, Украина)

The main scientific and technical tasks of a problem of progressing of boiler-furnace low temperature bubble fluid bed technology are reviewed.

Основу разведанных запасов ископаемого органического горючего в Украине составляет твердое топливо. Однако его доля в структуре топливного баланса отечественной энергетики составляет лишь немногим более половины. Остальную часть занимает жидкое и газообразное топливо, в основном, импортное, отличающееся весьма высокой ценой. В сложившихся сложных условиях нормализовать структуру указанного баланса можно единственным путем – широким последовательным переводом огнетехнических топочных устройств, работающих ныне на жидком или газообразном топливе, на сжигание твердого топлива. Эта проблема относится, прежде всего, к котельно-топочным системам промышленной энергетики.

Одной из важных частей этой проблемы является научно-техническая задача освоения высокоэффективного сжигания низкокачественного твердого топлива.

Среди известных котельно-топочных технологий наиболее полно решить указанную задачу позволяет технология низкотемпературного пузырькового кипящего слоя (КС). Это обстоятельство обусловило целесообразность скорейшего широкого применения котельно-топочных систем низкотемпературного пузырькового КС, способных высокоэффективно работать на энергетическом твердом топливе низкого качества [1, 2].

Проблематика развития технологии котельно-топочного КС определяется содержанием и темпом решения научно-технических задач, ее формирующих.

Коротко остановимся на основных из их числа.

Первая задача – ограничение интенсивности внешней эрозии – процесса эрозионного поражения котельных труб, соприкасающихся с инертом КС.

Известно, что интенсивность внешней эрозии определяет ресурс поверхностей нагрева, следовательно, ресурс котла (Кт). Утончение стенки котельных труб при этом может достигать нескольких миллиметров в год.

Основные факторы, влияющие на скорость внешней эрозии в конкретных физических условиях работы топки:

- эрозионная агрессивность частиц золы, образующих инерт КС;
- эрозионная стойкость материала труб;
- уровень нагрузки Кт.

Как показали выполненные исследования, каждый из перечисленных факторов поддается управляющему воздействию. При комплексном подходе к решению рассматриваемой задачи ресурс котельных труб, погруженных в КС, можно увеличить до нескольких десятков тысяч часов [3-5].

Вторая задача – сокращение длительности и повышение эффективности

процесса растопки Кт, оснащенных топками КС.

Известно, что растопка Кт с КС на твердом топливе отличается значительной длительностью: до нескольких часов. Это объясняется особенностями физической модели рассматриваемого топочного процесса: осуществляемому при растопке нагреву инерта сверху противодействует (охлаждает) поток пронизывающего его псевдоожижающего агента – холодного дутьевого воздуха.

Используемые на производстве технологические приемы растопки пока не позволяют радикально решить данную задачу.

Рассматриваемая задача существенно обостряется в условиях промышленных котельных, которые обслуживают потребителей с одно- или двухсменным режимом работы и резкопеременным графиком нагрузки. В этих условиях становится неизбежным ежедневный останов части Кт и последующая их растопка из холодного состояния, так как поддержание Кт КС в состоянии «горячего резерва» нецелесообразно, из-за высокой сложности и трудности управления осуществлением этого режима их работы.

Применение в котельных с Кт КС растопочного топлива жидкого или газообразного, из-за усложнения их топливной системы и высокой цены топлива этих видов, нельзя признать целесообразным.

Третья задача – повышение важного элемента технологической эффективности Кт КС – надежности. Это касается, прежде всего, нештатных условий использования Кт.

Наиболее существенной задачей является обеспечение надежности топочного устройства после внезапного возникновения нештатной обстановки, спровоцированной отказом тягодутьевых машин или аварийным исчезновением электропитания котельной.

Вследствие этого происшествия, особенно если до этого момента нагрузка Кт была высокой, из-за останова дутьевого вентилятора, прекращается подача дутьевого воздуха в топку, отвод из нее золы и отвод газов. Складывается острая напряженная нештатная опасная обстановка.

Находящийся в топке инерт массой порядка десятков-сотен кг/м² площади КС и температурой 850-950⁰С обладает большой суммарной теплоемкостью. Аккумулированная им теплота после прекращения подачи дутьевого воздуха начинает передаваться конструктивным элементам топки, которые касаются раскаленного инерта. Нештатный нагрев до высокой температуры вызывает в них термическую деформацию и окалинообразование, чем необратимо их повреждает. В этих условиях в общем случае невозможно удаление из топки горячего инерта.

Передача теплоты инертном топочным поверхностям нагрева Кт с естественной циркуляцией опасности не представляет. Задача удаления из топочной камеры выделяемых КС продуктов газификации содержащегося в нем топлива подлежит оперативному решению общеизвестными средствами.

Работу над решением рассмотренных трех задач необходимо вести как на этапе конструкторско-проектной разработки новых Кт КС, так и на этапе промышленной эксплуатации действующих агрегатов. Полнота и качество полу-

ченных решений существенно влияют на уровень экологической эффективности создаваемого Кт и котельной установки в целом.

При этом следует заметить, что при выборе целесообразного решения каждой из указанных задач, необходимо учитывать конкретные условия применения Кт. Главными из числа этих условий являются следующие:

- единичная мощность Кт;
- характер и режим нагрузки Кт;
- качественная характеристика проектного твердого топлива, в том числе ожидаемый диапазон колебаний ее показателей (особенно, гранулометрического состава, зольности, эрозионной агрессивности золы).

Отметим то, что в условиях промышленной эксплуатации Кт КС, для получения надлежащих технологических показателей их работы, необходимо обеспечить высокое качество управления оборудованием котельной установки [6].

В проектных разработках Кт должны быть использованы, естественно, значения каждого из указанных показателей, принятые по пределу, который соответствует наиболее неблагоприятным условиям работы Кт. Это позволит заложить на этапе проектирования определенный запас его надежности.

Для решения указанных задач, необходимо провести комплекс научно-технических и научно-организационных работ. Полученные решения должны быть типовыми для каждой из групп Кт, отвечающей определенным условиям применения, прежде всего, приведенным выше трем условиям.

Выводы.

1. Котельно-топочная технология низкотемпературного КС занимает приоритетное положение в сфере использования в энергетике топлива всех видов и сортов, включая твердое низкокачественное топливо.
2. Для повышения технологической эффективности Кт КС, необходимо получить высокоэффективное решение ряда научно-технических задач, в первую очередь, рассмотренных выше.
3. Каждое из разрабатываемых типовых решений указанных задач необходимо ориентировать на применение к Кт характерных групп, отличающихся единичной мощностью, режимом работы, свойствами проектного топлива.
4. Обеспечение высокоэффективного широкого использования Кт КС на твердом топливе является одной из важнейших задач развития энергетики Украины.

Литература: 1. Сжигание топлива в псевдооживленном слое // Махорин К.Е., Хинкис П.А. / Отв. ред. Сигал. И.Я. – К.: Ин-т газа АН УССР. – Наук. думка, 1989. 2. Воинов А.П. Проблематика применения топочно-псевдооживленного слоя в котельно-топочных процессах // Тези доп. 9 Міжнар. конф. "Удосконалення хімічних, харчових та нафтохімічних виробництв", 10-13 вересня 1998 р.: – Одеса: 1996. – С. 28. 3. Воинов А.П., Захарченко В.В. Влияние условий работы на эрозию поверхностей нагрева котла, погруженных в кипящий слой // Изв. вузов СССР. Энергетика. – 1984, № 1. – С. 74–77. 4. Воинов А.П. Положение трубы в кипящем слое и ее внешняя эрозия // Теплоэнергетика, 2003, № 8. – С. 59-61. 5. Воинов А.П., Воинова С.А. Возможность управления внешней эрозией в котлах с кипящим слоем // Теплоэнергетика, 2008, № 9. – С. 29-33. 6. Воинов А.П., Воинова С.А. Особенности автоматического управления котлами с низкотемпературным пузырьковым кипящим слоем. Вісник Інженерної академії України. – 1997. – № 2.

ОДИН ИЗ ВАРИАНТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ОТОПЛЕНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Федоров С.С., Тютюнов Д.Н., канд. техн. наук, Бойцова Е.А., канд. техн. наук
(г. Курск, Россия)

The function chart of management of heating dependent at-connection system with heat-carrier mixture is considered and modified. The mathematical model of system of automatic control of the scheme of dependent joining siste heatings with mixture is received. The power savings variant is offered at management at-water m heating system.

Теплоэнергетика является важнейшей структурной составляющей топливно-энергетического комплекса (ТЭК), потребляющей до 40% топливных ресурсов страны. От 70 до 95% жилого фонда, общественных сооружений и зданий обеспечивается путем централизованного теплоснабжения, что составляет более 60% коммунальных расходов потребителей тепла.

Ввиду столь высокой энергоемкости задачи теплорегулирования, энергообеспечения, энергосбережения, а также вопросы по повышению надежности и эффективности с учетом контроля, качества и работоспособности существующих систем автоматизации процесса теплоснабжения требуют разработки математических моделей, которые позволяют создавать и исследовать новые алгоритмы и структуры управления процессом отопления зданий [1].

Особый интерес вызывает применение математических методов при проектировании модели пофасадного регулирования отопления зданий.

1. Преимущества и недостатки систем автоматического регулирования. В последние годы все большую актуальность приобретают системы автоматического регулирования (САР) теплоснабжения. Применение САР имеет целый ряд положительных качеств:

- применение алгоритмов и управляющих программ для регулирования параметров, обеспечивает заданные условия функционирования систем теплоснабжения в автоматическом режиме;
- САР расширяет технические возможности отопительных систем и совершенствует систему контроля за их работоспособностью;
- САР осуществляет автоматический мониторинг и регулирование работоспособности систем отопления (подпитки и контроля за утечками теплоносителя, оперативной останов в случае аварии и т.п.).

Следует отметить, что автоматическое регулирование не лишено некоторых недостатков:

- алгоритмы и управляющие программы регулирования теплоснабжения должны адекватно моделировать динамику процессов отопления в тепловых сетях;
- математические модели (ММ) и программное обеспечение (ПО) САР нуждаются в привязке к местным тепловым сетям в виду большого разнообразия их конструкций;
- САР достаточно дорогостоящие и требуют определенных сроков окупае-

мости.

Опыт подсказывает, что данные недостатки можно ликвидировать за счет совершенствования и унификации ММ, ПО и элементной базы САР, что делает их более технологичными, универсальными и конкурентоспособными [3].

2. Математическая модель. Рассмотрим один из вариантов математической модели, отражающей функционирование зависимой схемы присоединения системы отопления со смешением воды (рис. 1).

Предлагаемая конструкция включает в себя: подающий (1) и обратный трубопроводы (2), регулирующие клапаны с энергоприводом V1 и V2 (3,4) смесительный насос N(5), тепловую нагрузку (обогреваемое помещение) R(6), САР(7), датчиков температуры отопляемого помещения (8), наружного воздуха (9), теплоносителя (10).

Рассмотрим номинальный режим работы схемы на рис. 1.

Из подающего трубопровода горячая вода поступает на клапан V1, который отрегулирован для ее подачи на тепловую нагрузку R и создания номинальной температуры в обогреваемом помещении. Далее в точке A она запитывает контур ARBA тепловой нагрузки R с помощью смесительного насоса N, поддерживающего постоянный тепловой поток части поступающей горячей воды через клапан V2. Отдавшая часть тепла вода после охлаждения в контуре попадает в обратный трубопровод и возвращается во внешнюю подающую систему. Следует отметить, что насос N, работая в номинальном режиме с постоянной частотой оборотов вала, проталкивает через клапан V2 постоянную порцию охлажденной воды из контура ARBA. Если температура наружного воздуха снижается, САР пропорционально увеличивает открытие клапана V1 и соответственно прикрывает клапан V2, что приводит к увеличению порции тепла, подаваемого на тепловую нагрузку R. Если температура наружного воздуха возрастает, САР пропорционально прикрывает клапан V1 и соответственно открывает клапан V2, что приводит к уменьшению порции тепла, подаваемого на тепловую нагрузку R.

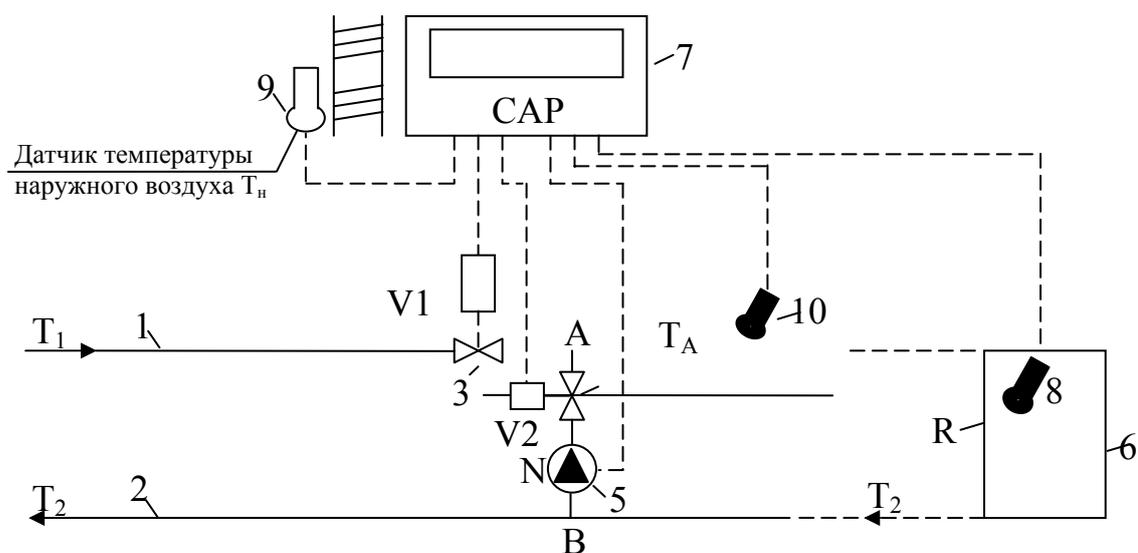


Рис.1. Вариант функционирования зависимой схемы присоединения системы отопления со смешением воды.

Схему на рис.1 можно усовершенствовать, исключив из нее питающий клапан V2, возложив его функции на смесительный насос N, рис.2. В этом случае САР будет реагировать на изменение температуры наружного воздуха, управляя частотой оборотов вала N и входным клапаном V1, рис.2.

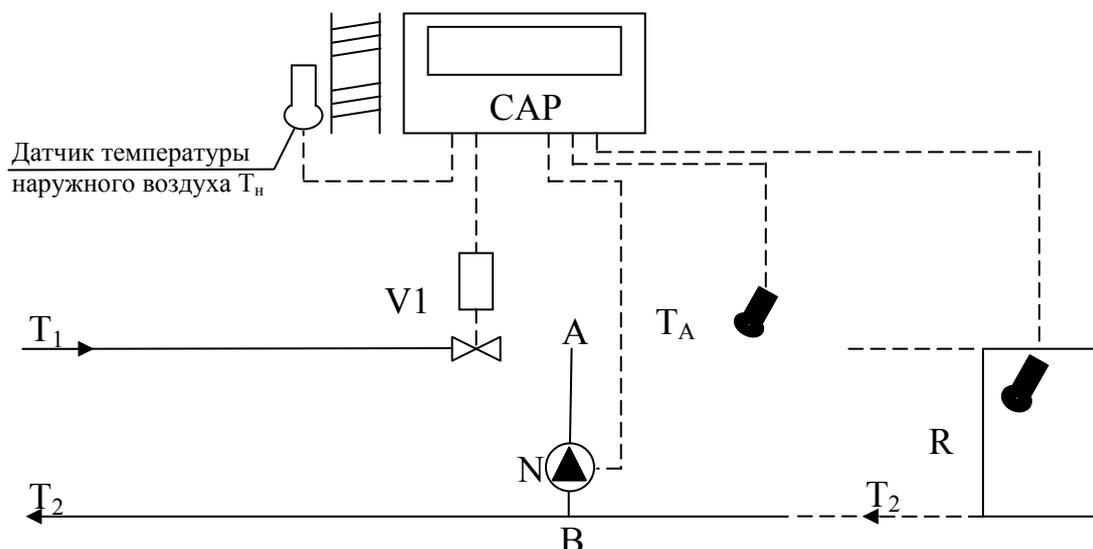


Рис.2. Модифицированный вариант функционирования зависимой схемы присоединения системы отопления со смешением воды.

Схема на рис.2 менее дорогостоящая и более проста в управлении.

Рассмотрим процесс теплообмена в схеме на рис. 2. К основным параметрам теплообмена отнесем: T_1, T_2 – соответственно температуры подающего и обратного трубопроводов, К; T_A, T_K, T_n – соответственно температуры воды за точкой А в контуре ARBA, в обогреваемом помещении и наружного воздуха, К; κ_1, κ_N – соответственно доли полного открытия клапана V1 и полной производительности смесительного насоса N; k – коэффициент теплопередачи фасадного ограждения, Вт/(м²·град); G_1, G_2, G_N, G_k – соответственно расходы воды в подающем и обратном трубопроводах, смесительном насосе N, отапливаемом помещении (тепловой нагрузке R), кг/ч; $Q_1, Q_2, Q_N, Q_K, Q_\Phi, Q_m$ – соответственно тепловые потоки, переносимые в подающем и обратном трубопроводах, смесительном насосе N, отапливаемом помещении (тепловой нагрузке R), подведенной фильтрацией, источников тепловыделения, Вт; F – площадь поверхности обогреваемого помещения (тепловой нагрузке R), м².

Отметим, что в номинальном режиме ко всем индексам будет добавлена буква «н».

Составим уравнение теплового баланса для тепловой нагрузки R на рис.2. В данном случае суммарный входной тепловой поток Q_{ex} расходуется на суммарный выходной тепловой поток $Q_{вых}$:

$$Q_{ex} = Q_{вых}, \quad (1)$$

причем

$$\left. \begin{aligned} Q_{ex} &= Q_{1A} + Q_N + Q_\Phi + Q_m \\ Q_{вых} &= Q_K + Q_2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где

$$\left. \begin{aligned} Q_{1A} &= \kappa_1 Q_1 \\ Q_\Phi &= C_1 = const \\ Q_m &= C_2 = const \\ Q_2 &= C_3 = const \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Тепловые потоки Q_N, Q_K опишем особо.

При выборе смесительных насосов для систем отопления, рекомендуемых в соответствии с требованиями [4] при их установке на перемычке между подающим и обратным трубопроводами (напор – на 2-3 м больше потерь давления в системе отопления), следует вычислять подачу насоса (расход воды) G_N по формуле:

$$G_N = 1,1uG_1, \quad (4)$$

где G_1 – определяется по формуле:

$$G_1 = 3,6 \frac{Q_1}{(t_1 - t_2)C}, \quad (5)$$

где $C = 4,266 \text{ кДж}/(\text{кг}^\circ\text{C})$ – удельная теплоемкость воды при температуре $t_1 = 130^\circ\text{C}$; t_1, t_2 – соответственно температуры подающего и обратного теплопроводов по шкале Цельсия $^\circ\text{C}$, u – коэффициент смешения, определяемый по формуле:

$$u = \frac{t_1 - t_A}{t_A - t_2}, \quad (6)$$

где t_A – температура воды за точкой А в контуре ARBA по шкале Цельсия.

Подставляя (6), (5) в (4), получим:

$$G_N = \frac{3,96Q_1(t_1 - t_A)}{(t_1 - t_2)(t_A - t_2)C} \quad (7)$$

или

$$G_N = \frac{0,928Q_1(t_1 - t_A)}{(t_1 - t_2)(t_A - t_2)}. \quad (8)$$

Отметим, что процесс отопления в номинальном режиме стационарный, т.е. не меняет значений своих параметров в контуре отопления с течением времени (например, теплового потока, расхода жидкости и т.п.).

Если учесть, что тепловые потоки пропорциональны соответствующим расходам ($Q_1 \sim G_1, Q_N \sim G_N$), получим согласно (4) соотношение:

$$Q_N = 1,1uQ_1. \quad (9)$$

Если учесть, что теплая вода проводит через вентиль V1 с долей полного открытия κ_1 , затем эта вода прокачивается через контур ARBA, тепловой нагрузки R с помощью смесительного насоса N , работающего с долей полной производительности κ_N , то величину Q_N можно получить по формуле:

$$Q_N = 1,1Q_1u\kappa_1\kappa_N. \quad (10)$$

Тепловой поток Q_K , переносимый по контуру ARBA, передается в тепло-

вую нагрузку R (отапливаемое помещение), создавая в нем номинальную температуру $t_k = 20^\circ C$. При стационарном режиме он путем теплопередачи передается через твердую стенку ограждения [2] и определяется по формуле:

$$Q_k = k(t_k - t_n)F. \quad (11)$$

Подставим (11), (10), (3) в (1), получим:

$$\kappa_1 Q_1 + 1,1 Q_1 u \kappa_1 \kappa_N + C_1 + C_2 = k(t_k - t_n) \cdot F + C_3 \quad (12)$$

$$\kappa_1 Q_1 (1 + 1,1 u \kappa_N) = k(t_k - t_n) \cdot F + C_3 - C_1 - C_2 \quad (13)$$

$$\kappa_1 (1 + 1,1 u \kappa_N) = \frac{1}{Q_1} [k(t_k - t_n) \cdot F + C_3 - C_1 - C_2] \quad (14)$$

Обозначив $\frac{1}{Q_1} [k(t_k - t_n) \cdot F + C_3 - C_1 - C_2] = C_4 = const$, имеем:

$$\kappa_N = \left(\frac{C_4}{\kappa_1 Q_1} - 1 \right) \cdot \frac{1}{1,1 u}; \quad \kappa_N = \frac{C_4}{1,1 u Q_1 \kappa_1} - \frac{1}{1,1 u}. \quad (15)$$

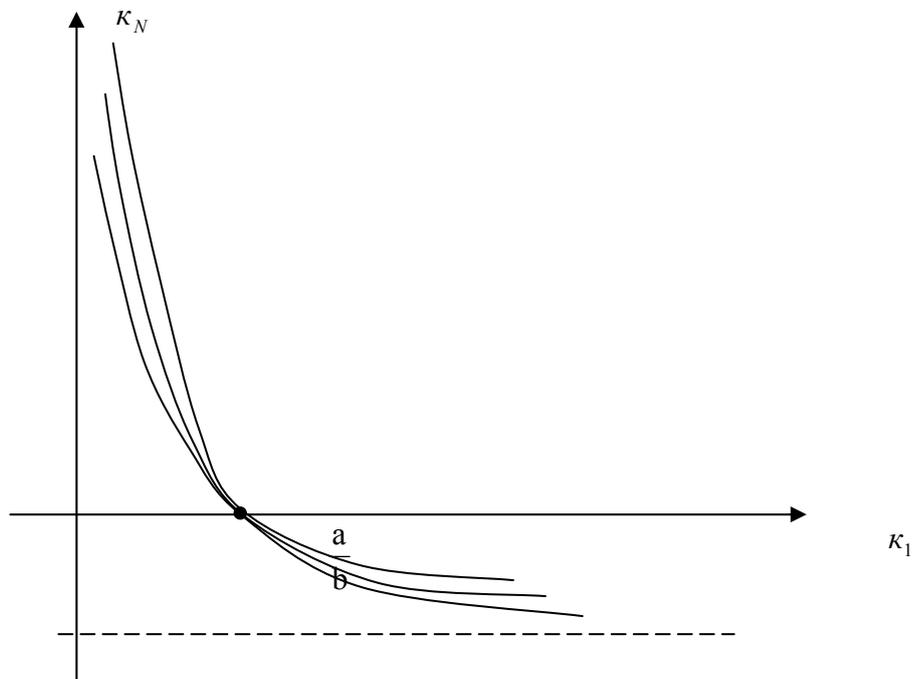


Рис. 3. Зависимость κ_N от κ_1 .

Упростим формулу (15), введя новые обозначения:

$$\frac{C_4}{1,1 u Q_1} = a; \quad \frac{1}{1,1 u} = b,$$

придем к зависимости, связывающей коэффициенты κ_1 и κ_N :

$$\kappa_N = \frac{a}{\kappa_1} - b, \quad (16)$$

где $a > 0$, $b > 0$, $0 < \kappa_1 < \frac{a}{b}$.

Графически зависимость (16) изображена на рис.3.

Из (16) следует, что коэффициенты κ_N и κ_I , связаны обратной пропорциональной зависимостью. Причем с ростом температуры наружного воздуха t_n соответствующая кривая семейства приближается к оси абсцисс и пересекает ее в точке a/b . На рис. 3 кривым I, II, III соответствуют температуры $t_{nI} < t_{nII} < t_{nIII}$. Отметим, что величина Q_1 для номинального режима известна и хранится в памяти САР.

3. Возможный вариант энергосбережения. Анализируя формулу (16), мы получили зависимость между κ_1 и κ_N , которая позволяет управлять электроприводами клапана V1 и смесительного насоса N. Очевидно, что при данном перепаде температур $\Delta t = t_K - t_n$ желательно, чтобы расход тепла в системе отопления был минимален. В этом случае актуально требование:

$$F(\kappa_1, \kappa_N) = \kappa_1 + \kappa_N \rightarrow \min. \quad (17)$$

Учитывая (16), получим:

$$F(\kappa_1, \kappa_N) = F(\kappa_1) = \kappa_1 + \frac{a}{\kappa_1} - b \rightarrow \min. \quad (18)$$

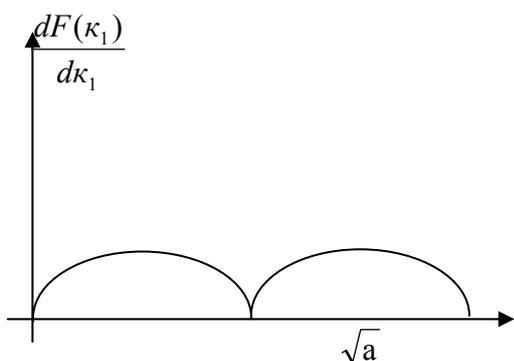


Рис.4. Условия локального минимума.

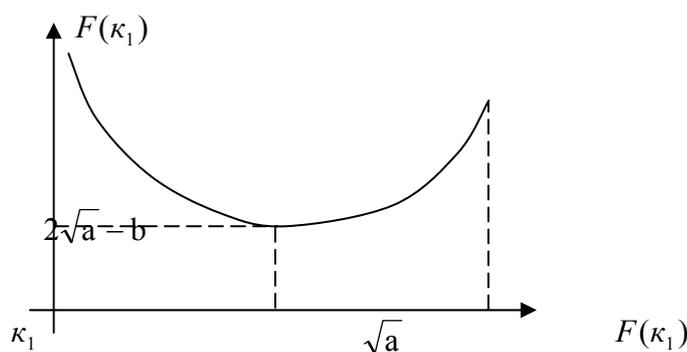


Рис.5. Зависимость $F(\kappa_1)$ на полуинтервале $(0;1]$.

Исследуем функцию $F(k_1)$ на локальный экстремум:

$$\frac{dF(\kappa_1)}{d\kappa_1} = 1 - \frac{a}{\kappa_1^2} \Rightarrow \frac{dF(\kappa_1)}{d\kappa_1} = 0, \text{ если } 1 - \frac{a}{\kappa_1^2} = 0, \text{ тогда:}$$

$\kappa_{11} = -\sqrt{a}$, $\kappa_{12} = \sqrt{a}$ – критические точки 1-го рода. Если учесть, что $\kappa_1 > 0$, то остается $\kappa_{12} = \sqrt{a}$. Из рис. 4 следует, что $F(\kappa_1)$ имеет локальный минимум в точке $\kappa_{12} = \sqrt{a}$, причем $F(\sqrt{a}) = 2\sqrt{a} - b$.

Определим $\frac{d^2F(\kappa_1)}{d\kappa_1^2} = \left(1 - \frac{a}{\kappa_1^2}\right)'_{\kappa_1} = \frac{2a}{\kappa_1^2} > 0$, т.е. график функции $F(\kappa_1)$

изображен выпуклостью вниз на полуинтервале $(0;1]$, точек перегиба не имеет.

Выводы. 1. Обоснован более простой вариант управления процессом отопления на рис. 2 по сравнению со схемой на рис. 1 Предлагаемый вариант теплоснабжения позволяет исключить один из управляющих клапанов V2, возложив

функции теплорегулирования на клапан V1 и смесительный насос N. Это дает возможность оптимизировать производственные затраты на обеспечение теплом и значительно упрощает управление САР этим процессом. 2. Получена зависимость (16) между долей полного открытия клапана V1 и долей k_N полной производительности насоса N, что является основой математической модели отопления. 3. Предложен вариант энергосбережения при управлении приводом системы отопления. Получены конкретные значения долей $k_1 = \sqrt{a}$ и $k_N = 2\sqrt{a} - b$, позволяющие получить минимальный расход тепла в системе отопления на рис. 2.

Научная статья написана в процессе выполнения НИР в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Литература: 1. Костриков С.В. Автоматизация процесса отопления зданий с применением теплообменников и учетом фасадного регулирования: дис...канд. техн. наук / А.Н. Потапенко – Белгород, 2005. – 146 с. 2. Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления / С.А. Чистов [и др.]. – Ленингр. отд-ние, Стройиздат, 1987. – 248 с. 3. Бушуев С.Д. Автоматика и автоматизация производственных процессов / С.Д. Бушуев, В.С. Михайлов: учеб. для вузов. - М.: высш. шк., 1986. – 367 с. 4. СП 41-101-95 Проектирование тепловых пунктов. – введ. 01.07.96. – М.: Минстрой РФ, ГУП ЦПП, 1997. – 111 с.

УДК 66.08 : 533.2 : 621.7.043

РАЗРАБОТКА МАЛОГАБАРИТНЫХ ГАЗОДЕТОНАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Сухов В.В., Савченко Н.Ф., канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)

Examined historical aspects and experience of creation of explosions of gases and subsequent directions of perfection of constructions of devices are offered with the use of energy of gas air-gases.

Впервые в отечественной и зарубежной практике использовать энергию взрыва горючих газовых смесей для формообразования листовых деталей предложено в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт» Пихтовниковым Р.В. [1].

Последующее интенсивное развитие импульсных методов формообразования во второй половине XX века было определено повышением требований к качеству и точности изготовления деталей, относительно быстрой их сменяемостью, а также отсутствием необходимого прессового оборудования для формообразования изделий из новых высокопрочных металлов и сплавов [2]. Полученные в этот период научные и практические результаты существенно расширили область знаний в области импульсных источников энергии. Дальнейшие разработки в этом направлении были продолжены Черепенниковым Б.А. [2] и другими исследователями [3-9]. По результатам исследований Черепенникова Б.А. на ГП «Киевский авиационный завод «АВИАНТ» были разработаны и внедрены механизированные детонационные - газовые пресса ДГП-100, ДГП-400, ДГП-600, ДГП-1200 для штамповки деталей из заготовок толщиной от 1,0 до 5 мм и габаритом до 1,4 мм [3].

Конструктивные особенности разработанных газодетонационных устройств и их габариты определены как параметрами изготавливаемых изделий (их размерами в плане, толщиной заготовки), так и физико-химическими процессами создания стабильных условий для возникновения детонаций газовой смеси. Поэтому при проектировании таких устройств следует учитывать, что для обеспечения условий непрерывного распространения детонационной волны камера взрыва должна выполняться конической, как правило, с углом конуса в пределах $30...45^\circ$. В этом случае габариты взрывных устройств определяются размерами штампуемой детали, а не необходимой работой деформирования. Поэтому в существующих камерах взрыва коэффициент использования энергии составляет не более $1,0 \dots 2,0 \%$ [4].

Одним из путей повышения эффективности преобразования энергии рабочего тела в полезную работу в газовзрывных прессах и уменьшения их габаритов является инициирование детонационного режима горения газовой смеси в отдельной объеме с последующим многоточечным инициированием данного режима горения газовой смеси в рабочем объеме камеры взрыва.

Конструктивно газовзрывной пресс с многоточечным инициированием детонации состоит из трубы детонации, распределительных трубок, переходных конусов и рабочего объема камеры взрыва [5-8]. Геометрические параметры трубы детонации выбираются из условий, обеспечивающих стабильное образование режима детонации при существенном снижении габаритов газодетонационного устройства.

Для метано-кислородной смеси, на основании опыта эксплуатации серийных прессов, диаметр и длину трубы детонации рекомендуется брать равными соответственно $32...35$ мм и $0,7...0,8$ м. Внутренний диаметр распределительных трубок должен быть выбран в пределах $10...15$ мм. При распространении детонационной волны по трубкам такого диаметра энергетические потери волны практически отсутствуют. Угол конуса и выходной диаметр переходного

конуса необходимо брать равными соответственно $18...20^\circ$ и $32...35$ мм.

Количество переходных конусов и передающих детонацию каналов зависит от расположения конусов по плоскости камеры взрыва (по углам треугольника, квадрата и т.д.) и расстояния между ними. При расположении конусов по углам квадрата рекомендуется длину стороны квадрата брать

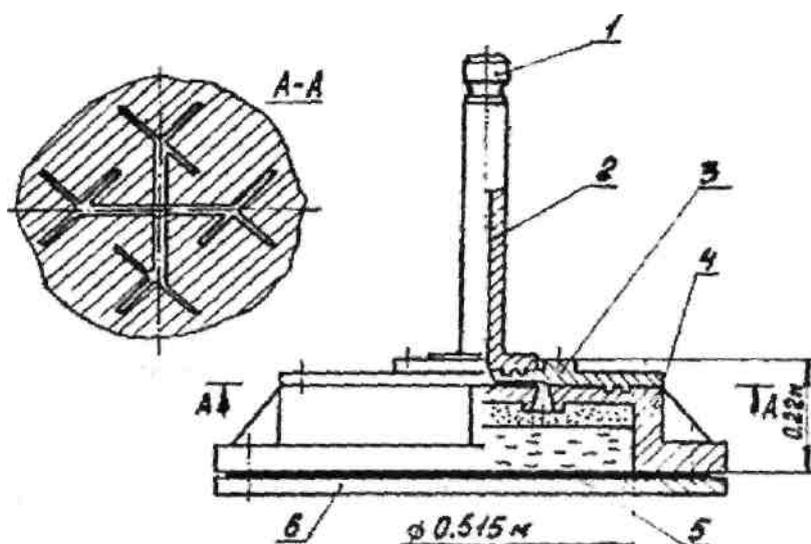


Рис. 1. Камера взрыва нового типа: 1 - форкамера; 2 - труба детонации; 3 - распределитель; 4 - корпус; 5 - резиновая диафрагма; 6 - прижим.

равной 100...150 мм. Расстояние от крайних конусов до боковой стенки камеры взрыва необходимо выбирать соответственно 50...75 мм.

При большом количестве распределительных трубок ухудшается условие монтажа установки и ее эксплуатации, снижается безопасность работы.

Для устранения указанных недостатков разработан плоский распределитель [7], в теле которого выфрезеровываются распределительные и промежуточные каналы. Такого типа конструкции распределителя реализована в камере взрыва, изображенной на рис. 1. Для сравнения на рис. 2 изображены коническая камера взрыва и камера взрыва нового типа. При одинаковом диаметре выходного очага камеры 0,515 м высота новой камеры в 2 раза меньше конической. Кроме того, путем перекрытия распространения детонационной волны по отдельным или группе переходных конусов можно изменять по форме величину силового воздействия по плоскости заготовки в пределах 20 -г 30 % от максимальной нагрузки.

Результаты исследований были реализованы в конструкциях газозрывных прессов ДГП-400 и ДГП-1200 М.

Последующие конструктивные усовершенствования газодетонационных устройств как прессового типа, так и модульного и легкотранспортируемых были направлены на повышение их универсальности и области применения. Было предложено (Авт. св. СССР № 1804934) использование в конструкции газодетонационных устройств специальных газогенераторных систем для получения горючих газов или их смесей. Разработанные устройства содержат импульсную камеру (для создания рабочих давлений) с детонационной трубой, блок поджига энергоносителя, газогенератор, корпус которого смонтирован на камере и имеет частично заполняемую газообразующими реагентами рабочую полость, сообщающуюся каналом с полостью импульсной камеры [9].



Рис. 2. Коническая камера взрыва и камера нового типа.

Газогенератор снабжен каналами для подачи горючих газов или смесей в полость газодетонационного устройства, а также для подачи реагента или реагентов и удаления продуктов реакции. В качестве реагентов могут служить вещества, образующие горючий газ или газы, образующие в смеси с воздухом устройства взрывчатую смесь-энергоноситель.

Таковыми веществами могут быть кислоты и металлы, гидриды металлов (выделение водорода), карбид кальция и вода (выделение ацетилена) и др.

Для технологических процессов листовой штамповки (тонколистовые заготовки) экспериментально установлено, что в большинстве случаев при использовании в качестве энергоносителя газа-ацетилена задаваемое по конструктивным соображениям соотношение давлений в газогенераторе и импульсной камере не превышает 2...10, что позволяет подбирать газогенератор минимального объема, удовлетворяющий требованиям к изготовлению деталей из различных материалов и типоразмеров с обеспечением потребных давлений при штамповке (до 100 МПа).

Для технологических процессов листовой штамповки (тонколистовые заготовки) экспериментально установлено, что в большинстве случаев при использовании в качестве энергоносителя газа-ацетилена задаваемое по конструктивным соображениям соотношение давлений в газогенераторе и импульсной камере не превышает 2...10, что позволяет подбирать газогенератор минимального объема, удовлетворяющий требованиям к изготовлению деталей из различных материалов и типоразмеров с обеспечением потребных давлений при штамповке (до 100 МПа).

Таковыми веществами могут быть кислоты и металлы, гидриды металлов (выделение водорода), карбид кальция и вода (выделение ацетилена) и др.

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают эффективность разработанных решений для повышения энергоемкости газодетонационных устройств, возможности расширения технологических возможностей (штамповка без и с нагревом заготовки, утилизация отходов), снижения их габаритов, возможности использования многокомпонентных газовых смесей.

Литература: 1. Пихтовников Р.В. Способ штамповки деталей. – Авт. свид. № 157957. 2. Черепенников Б.А. Исследование процесса листовой штамповки энергией детонационного взрыва газовой смеси. – Дис. .. канд. техн. наук: –Х.: ХПИ, 1962. – 254 с. 3. Трахтенберг Ю.Б., Климентьев В.И., Голованов В.Н. Импульсная штамповка деталей // Кузнечно-штамповочное производство. – 1974. – № 1. – С.4-6. 4. Каримов Э.Х. Исследование газоимпульсного процесса при горении метано-кислородной смеси. – Дис. ... канд. техн. наук. – Саратов: СПИ, 1973. – 180 с. 5. Черепенников Б.А., Сухов В.В. Устройство для штамповки. – Авт. свидетельство № 400144. 6. Степанченко В.А., Трахтенберг Ю.В, Сухов В.В. и др. Многокамерное устройство для газозрывной штамповки. – Авт. свид. № 403245. 7. Сухов В.В., Титов В.А., Трахтенберг Ю.Б. Устройство для газозрывной штамповки. – Авт. свид. № 510895 от 1 июля 1974 г. 8. Сухов В.В. Опыт создания газозрывных систем с многоточечным инициированием детонации метано-кислородной смеси // Авиационно-космическая техника и технология, 2007, № 11 (47). – С.182-185. 9. Савченко М.Ф. Пристрій для детонаційної газової штамповки. – Патент України №72357, 15.02.2005 р.

УДК 622.276.6

К РАЗРАБОТКЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОБЫЧИ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ

Савченко Н.Н. (Харьков, Украина)

Increase of efficiency of the second methods of extraction of minerals on the no-bottoms of their bedding set the problem new technologies at their booty.

Важнейшей задачей энерго- и ресурсосбережения при нефтедобыче является дальнейшее повышение эффективности вторичных методов извлечения полезных флюидов. В условиях конкретного месторождения выбор варианта технологического процесса является многокритериальным и в условиях неопределенности может осуществляться из нескольких логических предпосылок (ситуаций):

1. Имеющиеся решения (или решение) не являются оптимальными именно в этой производственной ситуации. В таком случае необходим поиск принципиально другой, более эффективной технологии. Подобная ситуация характерна, например, при замене традиционных методов заводнения тепловыми. Сложность же внедрения прогрессивных методов обуславливается не столько отсутствием достаточной информации об их технологических возможностях, сколько отсутствием критериев для оценки и применимости в условиях конкретного месторождения.

2. Предложенных решений может быть несколько, каждое из них допустимо (может существовать с тем же успехом, что и другое), но не оптимально, следовательно, применение любого варианта возможно лишь временно, является компромиссным. Примером может быть повышение коэффициента нефтеизвлечения кислотной обработкой ПЗП или паротепловым методом.

3. Новое решение (технология) не ухудшает, но и не улучшает все пока-

затели эффективности дальнейшей эксплуатации нефтяного месторождения. Подобные варианты могут возникать при внедрении новой технологии в условиях отсутствия подробной информации об области ее эффективного применения, а также в результате преднамеренного искажения информации из-за недобросовестной конкуренции. Как следствие, может иметь место неоправданная замена оборудования, технологий без повышения коэффициента нефтеизвлечения, без экономии ресурсов.

4. Предложенное решение (технология) не может быть оценено: содержит элементы ноу-хау, может быть использовано только при соблюдении определенных условий или ограничений, предварительно оговоренных или нет, требует тщательной проверки и т.д. Примером может быть приобретение нового оборудования и технологии, использование которых предполагает создание новых эффектов внутри пласта (как результат технологического последствия). Другим примером может считаться и отсутствие на данный период вообще технологии, отвечающей задаваемым технико-экономическим требованиям.

На основании анализа и физико-ситуационного моделирования условий добычи нефти или газа был сделан вывод о целесообразности использования в топливобывающей отрасли гибких технологических систем (ГТС) с использованием импульсных источников энергии типа изменяющих агрегатное состояние непосредственно в скважине веществ и горючих газов (природных или получаемых в скважине). Основные преимущества ГТС: возможность встраивания в существующие технологические комплексы при минимальных издержках и в экстремальных условиях внутри скважины, возможность осуществления различных технологических процессов (интенсификация нефтедобычи, проведение различных ремонтных работ и т.д.) без привлечения специализированных организаций, более высокий уровень безопасности проводимых работ по сравнению с применением взрывчатых веществ и порохов, механизация и автоматизация осуществляемых работ.

С этой целью как вариант интенсификации добычи нефти или газа в особо сложных условиях на глубинах более 3...4 км был разработан импульсно-волновой метод обработки призабойных зон, предполагающий возможность создания интенсивных силовых и газо-химико-термических воздействий на призабойную зону пласта путем использования как импульсных энергоносителей горючих газов, так и других энергоносителей (порох, пар). Импульсные воздействия, осуществляемые с использованием энергии, выделяющейся при горении (тепловой взрыв) и детонации горючих газовых смесей или расширении пара, позволяют в широких пределах регулировать интенсивность воздействий в ПЗП (создание репрессий и депрессий) и целенаправленно управлять волновыми механизмами переноса энергетических потоков внутри пласта.

В результате создаются предпосылки для изменения агрегатного состояния многокомпонентных смесей на внутрикапиллярных поверхностях в пористых средах с целью улучшения фильтрационных свойств пород, удаления парафина, смол, периодического прогрева пород пласта вокруг скважины, ликвидации последствий проникновения в пласт фильтрата бурового раствора. Как гибкая технологическая система разработанный метод интенсификации вторичного извлечения нефти может быть использован совместно с другими, традици-

онными, методами нефте-газодобычи. Такими методами, как заводнение (без или с использованием поверхностно-активных веществ, пен) или термическая обработка ПЗП (циклический и стационарный электропрогрев), термоакустические и электромагнитные обработки, циклическое паротепловое воздействие, при внутрипластовых взрывах жидких ВВ, предварительно введенных в пласт и других. Под влиянием импульса давления столб жидкости в скважине после взрыва колеблется с затухающей амплитудой, создавая на призабойную зону пласта переменные нагрузки, способствующие образованию и раскрытию трещин и выносу в скважину загрязняющих поры частиц. Температура у стенки скважины достигает 180...250°C. Все это в совокупности оказывает комплексное термогазохимическое импульсное воздействие на пласт, способствующее увеличению дебитов скважин при вытеснении нефти в залежах с тяжелой нефтью продуктами внутрипластового горения. При влажном и особенно сверхвлажном горении значительно улучшаются экономические показатели: сокращается необходимое количество нагнетаемого воздуха, количество горючего, необходимого для осуществления процесса, окислителя и время его закачивания. Горючие газы вырабатываются в газогенераторе (например, ацетилен) и после «осушения» в активаторе подаются с помощью трубопровода в полость импульсной камеры. При необходимости (импульсно-волновая обработка без интенсивных термических воздействий) в полость импульсной камеры подается из устья скважины или ресивера и окислитель, в качестве которого преимущественно используется кислород. В зависимости от обводненности скважины создаваемое высокое давление (при необходимости до 200 МПа) в импульсной камере воздействует либо непосредственно на внутрискважинное пространство, либо через поршень специальной конструкции. Скорость перемещения поршня и другие технологические параметры регулируются с помощью упруго-демпфирующих элементов. Максимальная энергоемкость устройства для импульсно-волновой обработки ПЗП с энергоносителем ацетилен – кислород 1, 5 МДж.

Таким образом, предложены новые методы обработки месторождений в системе гибких технологических комплексов.

УДК 539.171

ОБ ИЗМЕРЕНИИ КОРРЕЛЯЦИЙ ПОЛЯРИЗАЦИЙ В ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ

Спольник А.И., докт. физ-мат. наук, **Власенко В.Г.**, канд. физ-мат. наук,
Волчок И.В., канд. физ-мат. наук, **Калиберда Л.М.**, доцент,
Чегорян М.А., канд. физ-мат. наук, (г. Харьков, Украина)

Experimental possibilities are considered for measuring polarization correlation in the model of direct nuclear reactions and in case of threshold reactions with the knocking-out of the final particle in s-state.

1. Корреляция поляризаций в прямых ядерных реакциях

Рассмотрению поляризационных экспериментов при прямых ядерных реакциях в последние годы было посвящено значительное число исследований. Однако при обсуждении результатов одна из возможностей – измерение корреляции

ляции поляризации системы в конечном состоянии – не рассматривалась. Хотя этот эксперимент является в высшей степени трудным, представляется интересным рассмотреть в рамках какой-либо модели его возможности. Подчеркнем сразу же, что нас интересует в данном случае не столько вопрос о «полном опыте» – восстановлении всех элементов матрицы рассеяния, сколько предсказания в этом отношении определенной модели, наиболее часто используемой при интерпретации экспериментов по срыву дейтронов.

Задача ставится следующим образом.

Система в конечном состоянии описывается набором спин-тензоров $\langle T^{FGRT} \rangle$, где индексы $F = 0, 1, \dots, 2j, -F \leq G \leq F$ относятся к рангу спин-тензоров, описывающих поляризацию конечных ядер, а $\langle T^{RT} \rangle$, $R = 0, 1$ относятся к вылетающим протонам (для определенности мы говорим о (d, p) -реакции. В обычных экспериментах измеряется либо поляризация конечных ядер, т.е. величины $\langle T^{RT} \rangle = \frac{1}{\sqrt{2j+1}} \langle T^{00RT} \rangle$, либо величины $\langle T^{FG} \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \langle T^{FG00} \rangle$, которые дают поляризацию конечных ядер, когда поляризация вылетающих протонов не измеряется. Однако, может быть поставлен такой эксперимент, в котором измеряются такие величины, как $\langle T^{1G1T} \rangle$, $\langle T^{1G1T} \rangle$ и т.д. Действительно, если сечение рассеяния протонов на некоторой мишени

$$\sigma^p \sim \sum_{RT} \langle T^{RT} \rangle \langle \tau_{RT} \rangle^*,$$

где $\langle \tau_{R,T}(\theta_1, \varphi_1) \rangle$ – анализирующая способность мишени для протонов и

$$\sigma^i \sim \sum_{FG} \langle T^{FG} \rangle \langle \tau_{FG} \rangle^*$$

– сечение рассеяния конечных ядер, то интенсивность совпадений при одновременном рассеянии протонов на углы θ_1, φ_1 и ядер на углы θ_2, φ_2 дается формулой

$$I(\theta_1, \varphi_1; \theta_2, \varphi_2) \sim \sum_{FGRT} \langle T^{FGRT} \rangle \langle \tau_{RT}(\theta_1, \varphi_1) \rangle^* \langle \tau_{FG}(\theta_2, \varphi_2) \rangle^*. \quad (1)$$

Таким образом, зная анализирующую способность обеих реакций, можно определить, спин-тензоры $\langle T^{FGRT} \rangle$, дающие корреляцию поляризаций в ядерной реакции.

Рассмотрим информацию, получаемую путем измерений корреляции поляризаций в наиболее распространенной модели прямых ядерных реакций, когда амплитуда процесса записывается в рамках метода искаженных волн с учетом спин-орбитального взаимодействия протонных и дейтронных волн с ядрами. В рамках этого приближения интерпретируется большинство экспериментальных результатов изучения (d, p) -реакции, когда нейтрон захватывается в s-состояние.

Итак, для спин-тензоров корреляции $\langle T^{1010} \rangle$ получается следующее выражение:

$$\langle T^{1010} \rangle = \frac{\sqrt{2j+1}}{\sqrt{3(2j+1)}} (-)^{\frac{1}{2}+i+j} \left\{ \begin{matrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 \\ j & j & i \end{matrix} \right\} \left[\frac{2}{3\langle T^{20} \rangle} \left(1 - \frac{\sigma^d}{\sigma^0} \right) - 1 \right], \quad (2)$$

где i, j – соответственно спины начального и конечного ядер, σ^d – дифференциальное сечение реакции при выстроенных падающих дейтронах. Без ограничений общности мы можем считать векторную поляризацию дейтронов равной нулю; в противном случае необходимо произвести два эксперимента с различными направлениями ориентирующего поля в источнике. В (2) σ^0 – сечение при неполяризованных падающих частицах. Ось квантования здесь выбрана перпендикулярной плоскости реакции, а ось x – вдоль падающего дейтронного пучка. Следовательно, в рамках рассматриваемой модели измерение корреляции поляризаций оказывается эквивалентным измерению сечения при выстроенных падающих дейтронах.

И, наконец, если в модельном потенциале учесть не только спин-орбитальные, но и тензорные силы, то измерение корреляции будет эквивалентно измерению сечения с выстроенными дейтронами, но при этом существенна лишь зависимость от спин-тензоров $\langle T^{2\pm 2} \rangle$ и для корреляции поляризаций $\langle T^{1\pm 1 1\pm 1} \rangle$ имеет место следующая формула:

$$\langle T^{1\pm 1 1\pm 1} \rangle = \frac{\sqrt{2j+1}}{\sqrt{3(2j+1)}} (-)^{\frac{1}{2}+i+j} \left\{ \begin{matrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 \\ j & j & i \end{matrix} \right\} \frac{1}{\langle T^{2\pm 2} \rangle} \left[\frac{\sigma^d}{\sigma^0} - 1 \right]. \quad (3)$$

Таким образом, несмотря на сложность экспериментов, определение первых спин-тензоров корреляции не дает существенно новой информации по сравнению с обычными экспериментами с поляризованным дейтронным пучком. Все это, разумеется, справедливо в рамках метода искаженных волн, и отклонения экспериментальных результатов от приведенных выше будут указывать на необходимость учета высших приближений.

2. Корреляция поляризаций в пороговых реакциях

Общая теория ядерных реакций дает следующее выражение для спин-тензоров, описывающих корреляцию поляризаций в реакции $a+b \rightarrow c+d$:

$$\begin{aligned} \langle T^{FGRT} \rangle \sigma^0 &= \frac{\pi}{k_i^2} \frac{[F]_2^{\frac{1}{2}} [R]_2^{\frac{1}{2}}}{[i_a][i_b]} \sum_{abc} (-)^{F+G+R+T+J'+s+\bar{\ell}} \times \\ & [\bar{s}]^{1/2} [\bar{s}']^{1/2} [\ell]^{1/2} [\ell']^{1/2} [\bar{\ell}]^{1/2} [\bar{\ell}']^{1/2} [J][J'] \times \\ & \left\{ \begin{matrix} F & R & a \\ i_c & i_d & \bar{s}' \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} b & a & c \\ J' & \bar{s}' & \bar{\ell}' \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} J & s & \ell \\ \ell' & b & J' \end{matrix} \right\} (FGRT|aG+T) \times \\ & (\ell 0 \ell' 0 | b 0) (\bar{\ell} 0 \bar{\ell}' 0 | c 0) U_{als\bar{a}\bar{\ell}s}^J U_{al's\bar{a}\bar{\ell}'s'}^{J'*} Y_{a-G-T}(bk_i, ck_f). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь s и $\bar{s}(\bar{s}')$ – спины соответственно входного и выходного каналов,

$\ell(\ell')$ и $\bar{\ell}(\bar{\ell}')$ – орбитальные моменты в начальном и конечном состояниях, $J(J')$ – полные моменты системы; i_a, i_b, i_c, i_d – спины соответствующих частиц,

$$Y_{aa}(bk_i, ck_f) = \sum_{\beta\gamma} (b\beta c\gamma | a\alpha) Y_{b\beta}(k_i) Y_{c\gamma}(k_f). \quad (5)$$

Помимо явно указанного суммирования подразумевается суммирование по $s, \bar{s}(\bar{s}'), \ell(\ell'), \bar{\ell}(\bar{\ell}'), J(J')$.

Заметим, что каналовые спины во входном канале (в отличие от выходного) не интерферируют.

Интересным представляется случай пороговой ядерной реакции с энергией падающих частиц, настолько близкой к порогу, что орбитальный момент вылетающих частиц равен нулю. Для реакций с вылетом нейтронов такая ситуация легко может быть реализована. Тогда выражение (4) существенно упрощается и приобретает вид (ось квантования выбирается здесь вдоль падающего пучка)

$$\begin{aligned} \langle T^{FGRT} \rangle \sigma^0 &= \frac{1}{4k_i^2} \frac{[F]_2^1 [R]_2^1}{[i_a][i_b]} \sum_a (-)^{F+R+J'+s} \times \\ & [l]^{1/2} [l']^{1/2} [J][J'] \left\{ \begin{matrix} F & R & a \\ i_c & i_d & J' \\ i_c & i_d & J \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} J & s & \ell \\ \ell' & a & J' \end{matrix} \right\} \times \\ & \times (FGRT|a0)(\ell 0 \ell' 0|a0) U_{al\bar{s}\bar{a}0J}^J U_{al'\bar{s}\bar{a}0J'}^{J'*}, \end{aligned} \quad (6)$$

в этом случае корреляция поляризаций не зависит от угла вылета частиц d . Из сохранения четности следует, что a принимает лишь четные значения. Отсюда легко получить известный результат, что при $\bar{\ell}=0$ поляризация конечных частиц и ядер обращается в нуль, а выстраивание конечных ядер не зависит от угла и определяется выражением

$$\begin{aligned} \langle T^{FG} \rangle \sigma^0 &= \frac{1}{4k_i^2} [i_a]^{-1} [i_b]^{-1} \sum_a (-)^{J+J'+s+i_c+i_d} \times \\ & [l]^{1/2} [l']^{1/2} [J][J'] \left\{ \begin{matrix} J' & J & F \\ i_c & i_c & i_d \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} J & s & \ell \\ \ell' & F & J' \end{matrix} \right\} (\ell 0 \ell' 0|F0) U_{al\bar{s}\bar{a}0J}^J U_{al'\bar{s}\bar{a}0J'}^{J'*}. \end{aligned} \quad (7)$$

Вместе с выражениями для сечения процесса при выстроенных падающих частицах (поляризация не дает вклада в сечение, а выстраивание падающих частиц описывается спин-тензорами $\langle T^{IM} \rangle$)

$$\begin{aligned} \sigma^I - \sigma^0 &= \frac{1}{4k_i^2} [i_b]^{-1} \sum_{I=2,4,\dots} \langle T^{IM} \rangle \delta_{M0} \sum (-)^{2s'+\bar{s}+i_a+i_b} \times \\ & [s]^{1/2} [s']^{1/2} [l]^{1/2} [l']^{1/2} [J][I]^{-1/2} \left\{ \begin{matrix} J & s & \ell \\ I & \ell' & s' \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} s & s' & I \\ i_a & i_a & i_b \end{matrix} \right\} \times \\ & \times (\ell 0 \ell' 0|I0) U_{al\bar{s}\bar{a}0J}^J U_{al'\bar{s}\bar{a}0J'}^{J'*} \end{aligned} \quad (8)$$

и сечения при выстроенных начальных ядрах

$$\sigma^L - \sigma^0 = \frac{1}{4k_i^2} [i_a]^{-1} \sum_{L=2,4,\dots} \langle T^{LQ} \rangle \delta_{Q0} \sum (-)^{s'-\bar{s}+s+i_a+i_b} \times$$

$$[s]^{1/2} [s']^{1/2} [\ell]^{1/2} [\ell']^{1/2} [J][L]^{-1/2} \begin{Bmatrix} J & s & \ell \\ L & \ell' & s' \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} s & s' & L \\ i_b & i_b & i_a \end{Bmatrix} \times \quad (9)$$

$$\times (\ell 0 \ell' 0 | L 0) U_{a\ell s \bar{a} 0 J}^J U_{a\ell' s \bar{a} 0 J}^{J*}$$

формула (6) дает дополнительные уравнения для определения элементов U -матрицы.

В выражениях (8), (9) ось квантования направлена вдоль падающего пучка и правая часть не зависит от угла вылета конечных частиц.

УДК 628.16:621.981.3

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВЫХ РИФЛЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ

Крюк А.Г., канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)

We present new solutions for designing technology corrugated sheet profiles increased rigidity.

Одним из важнейших показателей качества металлопродукции являются ее прочностные характеристики. Повышение прочностных характеристик (временного сопротивления разрыву, предела текучести) может быть достигнуто путем холодной деформации металла или добавлением легирующих элементов в процессе его выплавки. Очевидно, что первый вариант упрочнения является более экономичным, так как не требует дорогостоящих легирующих добавок, а процесс упрочнения, например, при производстве гнутых профилей, может быть организован непосредственно в потоке профилегибочного стана. Разработанная в УкрНИИМете технология производства листовых рифленых профилей повышенной жесткости позволила определить принципиальную возможность организации производства на профилегибочных станах гнутых профилей, усиленных продольными рифлениями, из заготовок толщиной до 2,5 мм [1, 2]. Определено также, что формовка рифлений на полках и стенках гнутых профилей в 1,2...1,7 раза увеличивает прочностные характеристики заготовки, а также способствует увеличению жесткости ее элементов.

Применительно к техническим возможностям опытно - промышленного агрегата 1...4x50...300 УкрНИИМет была разработана и освоена технология производства упрочненного корытного профиля 80x60x32x2,5 мм. Технология деформационного упрочнения профилей является новым процессом, не применяющимся в настоящее время в отечественной металлургической промышленности и направленным на обеспечение развития производства эффективных видов металлопродукции, расширение сортамента, улучшение качества и значительное повышение прочностных свойств металлопродукции за счет совершенствования технологии производства проката. По данным потребителей новая разработанная технология позволяет получить гнутые профили на 20-25% прочнее аналогичных, изготовленных по традиционной технологии, а, следова-

тельно, на 15-20% легче. Полученная при освоении и отработке технологии партия профилей в объеме 5 тонн была применена для изготовления и испытания платформ прицепов с применением упрочненных профилей. Установлено, что упрочненный корытный профиль 80x60x32x2,5 мм практически равнопрочен применявшемуся ранее корытному профилю 80x60x32x3 мм.

Рассмотрим технологию профилирования и произведем расчет калибровки валков. Ширина заготовки для профилирования определялась в соответствии с конфигурацией профиля (рис. 1) по формуле: $B=2b_1+2b_2+2b_3+2\pi\rho$, где $\rho=R+KS_0$ – радиус нейтрального слоя; K – коэффициент, учитывающий смещение нейтрального слоя заготовки при профилировании. Для принятых размеров профиля искомая ширина составляла: $B = 2 \times 26,5 + 2 \times 51 + 70 + 2 \times 3,14(2 + 0,4 \times 2,5) = 243,84$ мм. Учитывая, что размеры боковых полок профилей 32 мм были получены с положительным допуском +1,5 мм, ширина заготовки (B) была принята равной 241 мм.

Экспериментально установлено, что формовку рифлений необходимо производить в два этапа, выполняя на каждом из них по четыре рифления. Рифления на участках заготовки, соответствующих вертикальным стенкам профи-

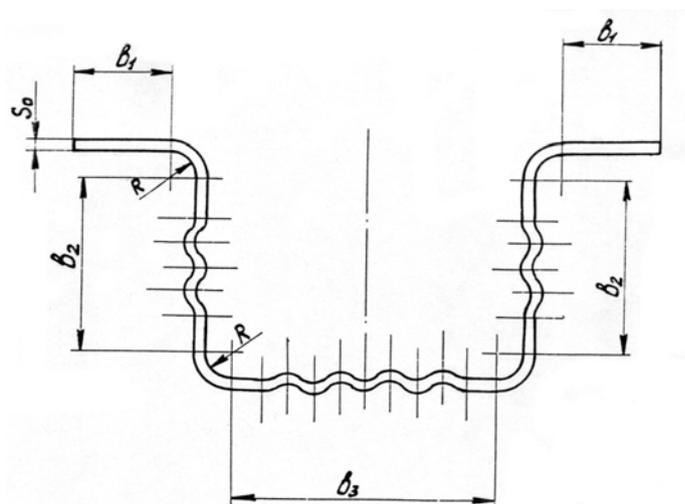


Рис. 1. Схема для определения ширины исходной при формовке корытного профиля 80x60x32x2,5, мм.

ля, необходимо выполнить до начала профилирования. Формовку четырех рифлений на горизонтальной стенке профиля, с целью снижения трудоемкости изготовления валков для профилирования, необходимо выполнять в конце процесса профилирования, непосредственно перед порезкой профиля на мерные длины. Режим профилирования принят тем же, что и для производства корытного профиля 80x60x32x3 мм –15°–30°–45°–60°–75°–85°–90°.

Для обеспечения формообразования радиуса R_2 у боковой полки, подгибка последней до угла 90°

производится при подгибке вертикальных стенок профиля на угол 85°.

Рассчитываемая калибровка валков предусматривала выполнение отдельных этапов формообразования профиля в следующих клетях агрегата: 8 клеть – формовка рифлений на участках заготовки, соответствующих боковым стенкам профиля; 9 клеть – подгибка вертикальных стенок и полок на угол 15°; 10 клеть – подгибка вертикальных стенок и полок на угол 30°; 11 клеть – подгибка вертикальных стенок и полок на угол 45°; 12 клеть – подгибка вертикальных стенок и полок на угол 60°; 13 клеть – формовка рифлений на горизонтальной стенке профиля; 14 клеть – подгибка вертикальных стенок и полок на угол 75°; летучие ножницы – порезка профиля на мерные длины; 15 клеть – подгибка вертикальных стенок и полок на угол 85° и полок на угол 90°; 16 клеть – под-

гибка вертикальных стенок и полок на угол 90° .

Размеры калибров рассчитывались в соответствии с методикой, согласно которой расчетные радиусы мест закругления R , линейные размеры валков, их диаметры определяются в зависимости от углов подгибки. Схема для расчета размеров калибра приведена на рис. 2. Разработанная технология производства упрочненного корытного профиля $80 \times 60 \times 32 \times 2,5$ мм предусматривает упрочнение рифлением заготовки на участках, соответствующих горизонтальной и вертикальным стенкам и ее профилирование в девяти клетях профилегбочного агрегата $1 \dots 4 \times 50 \dots 300$. Завалка валков в рабочие клетки и их настройка осуществлялись в следующей последовательности: 1) завалка нижних рабочих валков в $8 \dots 16$ клетки; 2) настройка нижних рабочих валков с помощью специальных настроечных шаблонов; 3) завалка верхних рабочих валков в $8 \dots 16$ клетки; 4) установка вертикальных и боковых зазоров в $9 \dots 12$ и $14 \dots 16$ клетях для профилирования (с помощью щупов); 5) установка вертикальных и боковых зазоров в 8 и 13 клетях (с помощью отрезков заготовки для профилирования). Для этого после осевой регулировки валков до получения равномерного бокового зазора между элементами, формирующими рифления, устанавливался зазор между гладкими цилиндрическими поверхностями валков, равный толщине заготовки и через клетки пропускались отрезки заготовки длиной 1500 мм. После замеров высоты рифлений производилась корректировка зазора. Последние операции повторялись до получения необходимой высоты рифлений.

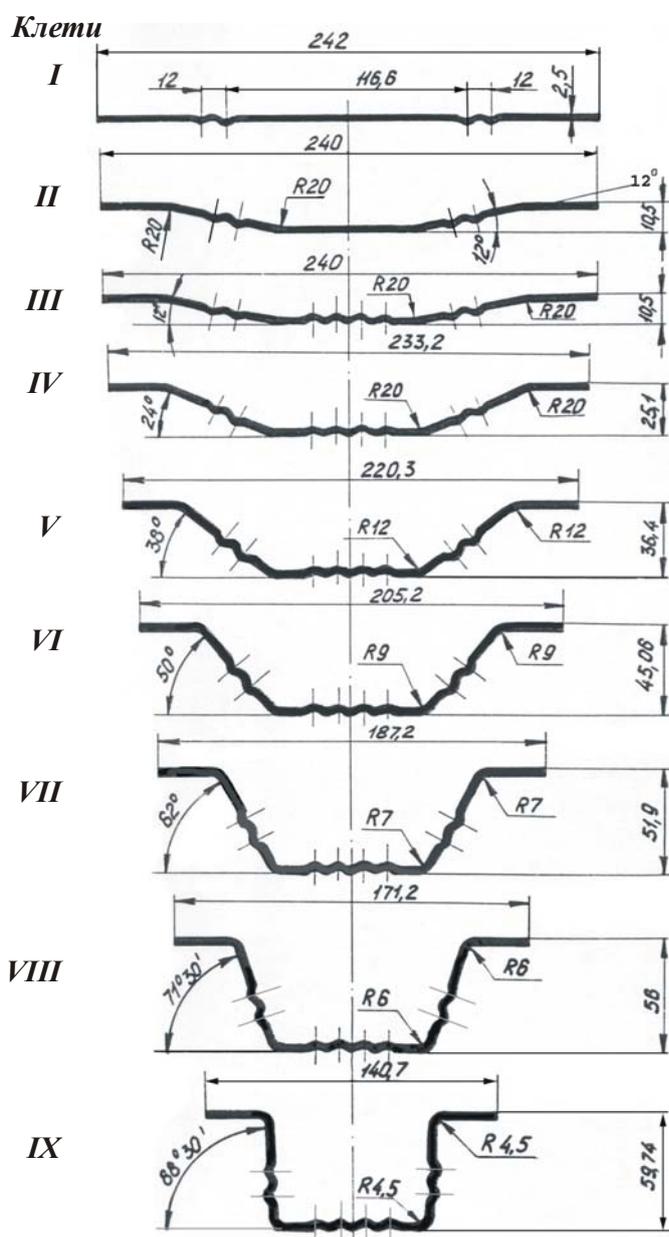


Рис. 2. Схема для расчета размеров калибров.

Профилирования (с помощью щупов); 5) установка вертикальных и боковых зазоров в 8 и 13 клетях (с помощью отрезков заготовки для профилирования). Для этого после осевой регулировки валков до получения равномерного бокового зазора между элементами, формирующими рифления, устанавливался зазор между гладкими цилиндрическими поверхностями валков, равный толщине заготовки и через клетки пропускались отрезки заготовки длиной 1500 мм. После замеров высоты рифлений производилась корректировка зазора. Последние операции повторялись до получения необходимой высоты рифлений.

Проведенные замеры геометрических размеров партии профилей показали, что полученные профили соответствуют требованиям чертежа. Профили отправлены Орскому заводу тракторных прицепов.

Одной из основных задач, ставившихся при освоении технологии производства упрочненных профилей, явля-

лось изучение износа валков в клетях для формовки рифлений. Необходимость проведения таких исследований обуславливалась тем, что формообразование рифлений осуществляется вытяжкой материала заготовки и, естественно, должно сопровождаться более интенсивным износом валков по сравнению с износом в клетях для профилирования.

Для разработки промышленной технологии, расчета калибровки валков и освоения производства швеллера 185x100x2,5 мм из предварительно упрочненной заготовки на стане 2...8x100...600 был разработан и согласован с потребителем чертеж швеллера 185x100x2,5мм (с полками и стенками, усиленными продольными рифлениями высотой 1 мм с шагом 12 мм). Этот профиль предназначен для замены швеллера 185x100x5 мм в конструкции транспортера.

Формовку рифлений на центральных участках стенки и полок швеллера предполагалось производить в первых клетях профилегибочного стана 2...8x100...600 на соответствующих участках плоской заготовки до начала профилирования швеллера. Для этого первая клетка стана использовалась как задающая – с цилиндрическими валками, вторая и третья клетки – соответственно для формовки 12 рифлений в центральной части заготовки и 10 рифлений на ее боковых участках, 4...8 клетки – для постепенной подгибки полок до угла 90° и 9 клетка – чистовая.

Профилирование заготовки с продольными рифлениями, расположенными вне мест изгибов профиля, не имеет принципиальных отличий от профилирования гладкой заготовки, поэтому для освоения производства швеллера 185x100x2,5 мм в 4...9 клетках использовались те же валки, что и для производства швеллера 185x100x5 мм (с корректировкой зазоров в калибрах по толщине заготовки).

Для центрирования заготовки валки второй и третьей клеткой образуют калибры закрытого типа. Профиль формирующих участков калибров валков определен на основании геометрического расчета по чертежу швеллера. Для снижения расхода металла на изготовление валков на недеформирующих участках калибров установлены дистанционные кольца.

Для освоения производства швеллера 185x100x2,5 мм использовались четыре рулонные заготовки, полученные после продольного роспуска рулонов массой до 6 т на АПР. Заготовки, полученные с крайних боковых участков рулонов имели одностороннюю волнистость с высотой волн до 20 мм и периодом 400-600 мм. При профилировании таких заготовок наблюдалось наличие волнистости полок с высотой волны до 6 мм и шагом 100...120 мм. При профилировании заготовок из средней части рулонов, не имеющих волнистости по боковой кромке, получены швеллеры, отвечающие требованиям чертежа. Швеллер 185x100x2,5 мм отгружен ПО УХ-16/5 (г. Омск) для изготовления опытной партии транспортеров.

При профилировании швеллера 185x100x2,5 мм методом электротензометрии были произведены замеры усилий деформирования при формовке рифлений в наиболее нагруженной второй клетке стана. Полученный результат 244 кН (24,9 т) меньше допускаемого для клетки стана 2...8x100...600 усилия 294 кН (30 т).

Освоение листовых рифленых профилей повышенной жесткости 1263x7x1,5 мм на профилегибочном агрегате 0,5-2, 5x300-1500 для Харьковского завода «Кондиционер» производилось для замены в камерах орошения промышленных кондиционеров листовой стали толщиной 2 мм.

Данный профиль является наименее технологичным из трех рифленых профилей повышенной жесткости, подлежащих освоению, т. к. имеет несимметричное поперечное сечение. Суммарная годовая потребность в профилях – 6,5 тыс. т. Разработанный чертеж профиля 1263x7x1,5 мм, подлежащего первоочередному освоению, предусматривал формообразование элемента двойной толщины у одной из боковых кромок профиля с формовкой на нем двух сквозных гофров высотой 5,5 мм, а также формовку 7 групп рифлений высотой 2,5 мм и шагом 8 мм на заготовке толщиной 1,5 мм.

Формообразование профиля предполагалось осуществить в 12 клетях агрегата: в 1...11 клетях – формообразование элемента двойной толщины с двумя отформованными на нем сквозными гофрами; в 3...9 клетях – формовку семи групп рифлений; в 12 клетки – чистовую формовку профиля.

Освоение профиля показало, что при прохождении заготовки через 1...5 клетки происходит ее провисание на участке дистанционных колец между опорными элементами ($\text{Ø}366$ мм; $B = 100$ мм) со стороны привода, что приводит к короблению и смятию правой боковой кромки заготовки опорными элементами шестой клетки. Для устранения этого недостатка в 1-6 клетях опорные элементы были смещены к центру валков на 200 мм, а дистанционные элементы перенесены в сторону привода.

Повторное освоение профиля выявило следующие недостатки:

- в 5,6,7 и 10 клетях получить требуемую чертежом высоту рифлений не представилось возможным из-за совмещения в этих клетях операций формовки рифлений и подгибки боковой кромки заготовки (для получения элемента двойной толщины). Формообразование рифлений производится за счет вытяжки материала заготовки, сопровождающейся значительным давлением металла на валки, что приводит к их прогибу. Поэтому для получения требуемой высоты рифлений необходимо уменьшение зазора между валками, что приводит к раскатке металла в местах подгибки элемента двойной толщины;
- в 12 клетки из-за неточностей в изготовлении валков наблюдалась переформовка некоторых отформованных в предыдущих клетях рифлений. Кроме того, из-за прогиба валков произвести доформовку до требуемой высоты рифлений, полученных в предыдущих клетях, не удалось;
- недостаточная прочность бурта ($\text{Ø}370$ мм, $B = 8$ мм) формирующего элемента верхнего валка 1У-51-39 шестой клетки привела к его поломке (выкрашиванию), что не позволило продолжить работы по освоению профиля.

По результатам освоения профиля совместно с представителями завода «Кондиционер» принято решение:

1) отказаться от применения в конструкции фланцев камер орошения кондиционеров профилей с элементами двойной толщины, нетехнологичных в изготовлении и требующих большого количество валковой оснастки, заменив их ребрами жесткости, получаемыми подгибкой боковой кромки профиля на ли-

стогибочном прессе у потребителя;

2) при повторном освоении формообразование профиля производить в 8 клетях агрегата, не совмещая операцию формовки рифлений с другими операциями: в первой клетке – формовку двух сквозных гофров; во второй – восьмой клетках – формовку семи групп рифлений;

3) отказаться от применения чистой клетки;

4) после проведения испытаний камер орошения кондиционеров с новой конструкцией фланцев, произвести их повторное освоение.

Сравнительно небольшой объем освоения не позволяет достоверно определить величину и характер износа валков для формовки рифлений. Вместе с тем известно, что, например, для изготовления валков, обладающих высокой износостойкостью, используют стали, легированные марганцем и хромом. Для валков с особо высокой износостойкостью используют инструментальные стали, легированные марганцем, хромом, молибденом (отличаются от вышеуказанных сталей высоким содержанием хрома: от 4,8 до 14%). Вопрос исследования стойкости валков при формообразовании рифлений может потребовать дальнейших исследований для организации промышленного производства упрочненных специальных профилей в Украине.

Список литературы: 1. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.5. “Обработка металлов методами пластического деформирования” – Одесса: ОНПУ, 2004. – 522 с. 2. Тришевский О.И., Крюк А.Г. Профили высокой жесткости с периодически повторяющимися гофрами // Металлургия и коксохимия. – Вып. 71, 1981. – С. 10-14.

3. ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ МАШИН, ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИКИ, МЕХАНИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

УДК 539.3

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ДЛЯ РАСЧЕТА РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ И ПОЛЗУЧЕСТИ

Морачковский О.К., докт. техн. наук,

Ромашов Ю.В., канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)

Based on continual fracture mechanics models and Galerkin method for rupture life theoretical prediction of constructions in the stress corrosion cracking and creep environment is discussed in this paper. Results for bars tension problems illustrated proposed models and method capabilities are shown.

Актуальность проблемы. Коррозионное растрескивание и ползучесть характерны для термосилового оборудования атомной энергетики из-за специфических условий эксплуатации: высокие температуры, механические нагрузки, взаимодействие с агрессивной средой, насыщенной хлоридами [1]. Взаимовлияние коррозионного растрескивания и ползучести обусловлено, как минимум, перераспределением напряжений. Учет взаимовлияния коррозии и ползучести, является одной из актуальных научно-технических проблем [2, 3].

Анализ исследований и публикаций. Ползучесть в настоящее время рассматривают совместно с коррозионными процессами, протекающими по диффузионным механизмам, как, например, в водородосодержащих средах [2, 3]. Коррозионное растрескивание традиционно рассматривают без учета ползучести [1]. Для описания коррозионного растрескивания предложено большое число качественных моделей, каждая из которых позволяет объяснить лишь отдельные феноменологические факты. Зависимость от механических напряжений и сложность выделения какого-либо превалирующего механизма [1] затрудняют расчетное прогнозирование коррозионного растрескивания.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка моделей и методов для расчета ресурса элементов конструкций, эксплуатирующихся в условиях коррозионного растрескивания и ползучести. Для этого на основе механики рассеянного разрушения предложены модели и рассмотрено применение метода Бубнова-Галеркина; представлены решения простейших задач.

1. Математическая постановка. Элемент конструкции, представляем в виде деформируемого твердого тела, занимающего область Y , ограниченную поверхностью ν ; положения точек рассматриваем в криволинейных координатах x^k . Предполагаем, что ресурс элемента конструкции в условиях коррозионного растрескивания и ползучести ограничивается развитием трещин коррозионного растрескивания, накоплением необратимых деформаций ползучести и накоплением микрповреждений в материале вследствие ползучести.

Для описания развития коррозионных трещин вводим в точках поверхности тела, взаимодействующих с агрессивной средой, скалярный параметр κ – нормированную длину трещины такую, что $\kappa = 0$ отвечает визуально невиди-

мой трещине, а $\kappa = 1$ отвечает наиболее короткой из видимых трещин. Скорость изменения нормированной длины трещины κ зависит от определяемого по компонентам σ^{ij} тензора напряжений раскрывающего трещину растягивающего напряжения $\sigma_\kappa = \sigma_\kappa(\sigma^{ij})$, а также от текущего значения длины [2, 3]:

$$\dot{\kappa} = \begin{cases} 0, \sigma_\kappa \leq 0, \\ f_\kappa(\kappa; \sigma_\kappa, T, \chi_1, \chi_2, \dots), \sigma_\kappa > 0, \end{cases}; \kappa|_{t=0} = 0, \quad (1)$$

где $f_\kappa(\kappa; \sigma_\kappa, T, \chi_1, \chi_2, \dots)$ - функция приложенного растягивающего напряжения, определенная для заданных значений параметров χ_1, χ_2, \dots характеризующих свойства агрессивной среды, например ионов хлора, и температуры.

Для определения деформаций ползучести используем теорию инкрементального типа; накопление скрытых повреждений в объеме материале вследствие ползучести учитываем при помощи параметра повреждаемости ω [2]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{c}_{ij} &= \frac{3}{2} \frac{f_c(\omega; \sigma_c, T)}{\sigma_c} \left(g_{ik} g_{jl} \sigma^{kl} - \frac{1}{3} g_{kl} \sigma^{kl} \right); c_{ij}|_{t=0} = 0; \\ \dot{\omega} &= f_\omega(\omega; \sigma_c, T); \omega|_{t=0} = 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\sigma_c = \sigma_c(\sigma^{ij})$, $\sigma_\omega = \sigma_\omega(\sigma^{ij})$ - эквивалентные напряжения, в частности, совпадающие с интенсивностями напряжений; $f_c(\omega; \sigma_c, T)$ и $f_\omega(\omega; \sigma_c, T)$ - заданные функции, вид которых отвечает какому-либо феноменологическому закону ползучести и кинетическому уравнению повреждаемости.

Уравнения (1), (2) следует решать с учетом перераспределения во времени полей напряжений σ^{ij} . Для малых деформаций, позволяющих отождествлять исходную и актуальную конфигурации для однородного изотропного тела, эти уравнения в общепринятых обозначениях записываются, например, так:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x^j} + \frac{\partial u_j}{\partial x^i} \right) - \Gamma_{ij}^k u_k &= \frac{1}{2\mu} \left(g_{ik} g_{jl} \sigma^{kl} - \frac{\lambda}{3\lambda + 2\mu} (g_{kl} \sigma^{kl}) g_{ij} \right) + c_{ij} + g_{ij} \alpha (T - T_0); \\ \frac{\partial \sigma^{ij}}{\partial x^j} + \Gamma_{jk}^i \sigma^{jk} + \Gamma_{jk}^j \sigma^{ik} + f^i &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Уравнения (1)-(3) следует рассматривать с учетом граничных условий:

$$\sigma^{ij} n_j = p^i, (\forall x^k \in \upsilon_p); u_i = u_i^*, (\forall x^k \in \upsilon_u); \sigma^{ij} n_j = p_\kappa n^i, (\forall x^k \in \upsilon_\kappa), \quad (4)$$

где $\upsilon_p \supset \upsilon$ - часть поверхности, на которую действуют заданные поверхностные нагрузки с интенсивностью \vec{p} ; $\upsilon_u \supset \upsilon$ - часть поверхности, на которой заданы перемещения \vec{u}^* ; $\upsilon_\kappa \supset \upsilon$ - часть поверхности, на которую действует агрессивная среда давлением p_κ , вызывающая коррозионное растрескивание.

Расчет ресурса элементов конструкций при коррозионном растрескивании и ползучести, состоит в интегрировании уравнений (1)-(3) вплоть до момента времени $t = t^*$, отвечающего достижению либо критического значения $\omega = 1$ параметра повреждаемости, либо критического значения $\kappa = 1$ нормированной длины коррозионной трещины.

2. Метод решения. Интегрирование уравнений (1)-(3) практически осуществимо при помощи численных методов. Соответствующий вычислительный

процесс удобно представить в терминах матричных операций. Представим уравнения (1)-(3) в операторной форме:

$$\dot{\kappa} = f_{\kappa}(\kappa; \mathbf{u}), (\forall t \geq 0, \forall x^k \in v_{\kappa}); \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{f}_{\mathbf{v}}(\mathbf{v}; \mathbf{u}); \mathbf{A}\mathbf{u} = \mathbf{f} + \mathbf{C}\mathbf{v}, (\forall t \geq 0, \forall x^k \in Y), \quad (5)$$

где \mathbf{v} - вектор, составленный из компонент деформаций ползучести и параметра повреждаемости; \mathbf{u} - вектор, составленный из компонент напряжений и перемещений.

Искомые неизвестные задачи представим аппроксимациями по системам глобальных пробных функций:

$$\left. \begin{aligned} \kappa(x^k, t) &\approx \Phi_{\kappa}^{(n)}(x^k) \cdot \mathbf{a}_{\kappa}^{(n)}(t); \mathbf{v}(x^k, t) \approx \Phi_{\mathbf{v}}^{(n)}(x^k) \cdot \mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(n)}(t); \\ \mathbf{u}(x^k, t) &\approx \mathbf{u}_v(x^k) + \Phi_{\mathbf{u}}^{(n)}(x^k) \cdot \mathbf{a}_{\mathbf{u}}^{(n)}(t), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где n - число пробных функций; $\Phi_{\kappa}^{(n)}$, $\Phi_{\mathbf{v}}^{(n)}$, $\Phi_{\mathbf{u}}^{(n)}$ - матрицы, составленные из пробных функций пространственных координат x^k ; \mathbf{u}_v - заданный вектор, пролезающий граничные значения внутрь области; $\mathbf{a}_{\kappa}^{(n)}$, $\mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(n)}$, $\mathbf{a}_{\mathbf{u}}^{(n)}$ - векторы, составленные из подлежащих определению коэффициентов аппроксимаций - функций времени.

Глобальные пробные функции в матрицах $\Phi_{\kappa}^{(n)}$, $\Phi_{\mathbf{v}}^{(n)}$, $\Phi_{\mathbf{u}}^{(n)}$ и вектор \mathbf{u}_v выберем так, чтобы аппроксимации (6) тождественно удовлетворяли граничным условиям (4). Для областей сложной формы такие глобальные аппроксимации можно построить при помощи методов теории R-функций [4].

Коэффициенты аппроксимаций (6) определим при помощи метода Бубнова-Галеркина, который приводит к нелинейной задаче Коши для определения векторов $\mathbf{a}_{\kappa}^{(n)}$, $\mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(n)}$, $\mathbf{a}_{\mathbf{u}}^{(n)}$:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{a}}_{\kappa}^{(n)} &= (\mathbf{A}_{\kappa}^{(n)})^{-1} \cdot \mathbf{f}_{\kappa}^{(n)}(\mathbf{a}_{\kappa}^{(n)}, \mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(n)}); \mathbf{a}_{\kappa}^{(n)}|_{t=0} = \mathbf{0}; \\ \dot{\mathbf{a}}_{\mathbf{v}}^{(n)} &= (\mathbf{A}_{\mathbf{v}}^{(n)})^{-1} \cdot \mathbf{f}_{\mathbf{v}}^{(n)}(\mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(n)}); \mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(n)}|_{t=0} = \mathbf{0}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{\kappa}^{(n)} &= \int_{v_{\kappa}} (\Phi_{\kappa}^{(n)})^T \Phi_{\kappa}^{(n)} dV, \quad \mathbf{f}_{\kappa}^{(n)}(\mathbf{a}_{\kappa}^{(n)}, \mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(n)}) = \int_{v_{\kappa}} (\Phi_{\kappa}^{(n)})^T \cdot f_{\kappa}(\mathbf{a}_{\kappa}^{(n)}, (\mathbf{A}_{\mathbf{u}}^{(n)})^{-1} \cdot (\mathbf{f}_{\mathbf{u}}^{(n)} + \mathbf{C}_{\mathbf{uv}}^{(n)} \mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(n)})) dV; \\ \mathbf{A}_{\mathbf{v}}^{(n)} &= \int_Y (\Phi_{\mathbf{v}}^{(n)})^T \Phi_{\mathbf{v}}^{(n)} dY, \quad \mathbf{f}_{\mathbf{v}}^{(n)}(\mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(n)}) = \int_Y (\Phi_{\mathbf{v}}^{(n)})^T \cdot \mathbf{f}_{\mathbf{v}}(\Phi_{\mathbf{v}}^{(n)} \mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(n)}; (\mathbf{A}_{\mathbf{u}}^{(n)})^{-1} \cdot (\mathbf{f}_{\mathbf{u}}^{(n)} + \mathbf{C}_{\mathbf{uv}}^{(n)} \mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(n)})) dY; \\ \mathbf{A}_{\mathbf{u}}^{(n)} &= \int_Y (\Phi_{\mathbf{u}}^{(n)})^T \Phi_{\mathbf{u}}^{(n)} dY; \quad \mathbf{f}_{\mathbf{u}}^{(n)} = \int_Y (\Phi_{\mathbf{u}}^{(n)})^T \cdot (\mathbf{f} - \mathbf{A}\mathbf{u}_v) dY; \quad \mathbf{C}_{\mathbf{uv}}^{(n)} = \int_Y (\Phi_{\mathbf{u}}^{(n)})^T \cdot \mathbf{C} \Phi_{\mathbf{v}}^{(n)} dY. \end{aligned}$$

3. Простейшие задачи. Для оценки предложенных моделей и метода решения задач о коррозионном растрескивании и ползучести рассмотрены решения задач о растяжении стержней из аустенитной нержавеющей стали типа 18-8 [1, 5] в 30 % растворе $MgCl_2$ при постоянной нагрузке (рис. 1) в 160 МПа и постоянной деформации (рис. 2). Верхние штриховые кривые, характеризующие изменение во времени длины трещины κ , отвечают расчетам, полученным с использованием эффективных напряжений $\sigma_{eff}^{ij} = \sigma^{ij} / (1 - \omega)$ в кинетическом уравнении (1). Видно, что предложенные модели позволяют учесть влияние на

развитие трещин коррозионного растрескивания перераспределений напряжений как вследствие ползучести (релаксация напряжений), так и вследствие накопления повреждаемости (концепция эффективного напряжения).

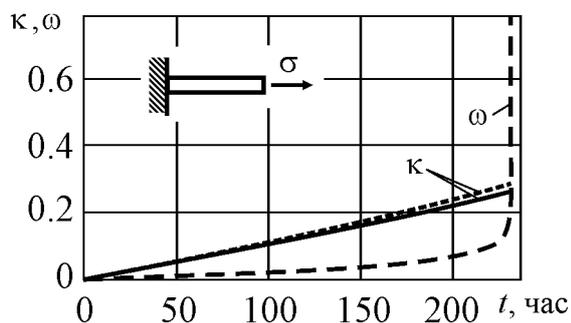


Рис. 1. Растяжение стержня постоянной нагрузкой

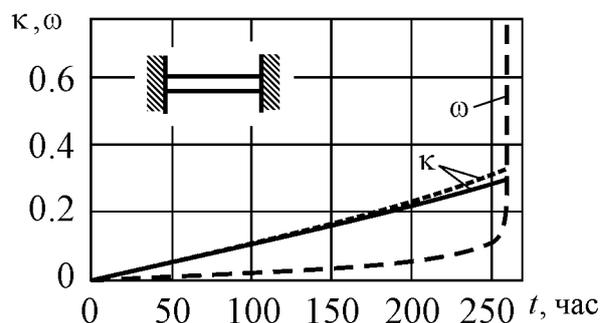


Рис. 2. Растяжение стержня при постоянной деформации

Выводы. На основе механики рассеянного разрушения разработаны модели и рассмотрено применение метода Бубнова-Галеркина для расчета ресурса элементов конструкций, эксплуатирующихся в условиях коррозионного растрескивания и ползучести. В задачах о растяжении стержней показано влияние ползучести на развитие трещин коррозионного растрескивания.

Литература: 1. Погодин В.П., Богоявленский В.Л., Сентюрев В.П. Межкристаллитная коррозия и коррозионное растрескивание нержавеющей сталей в водных средах. – М.: Атомиздат, 1970. – 294 с. 2. Локощенко А.М. Ползучесть и длительная прочность металлов в агрессивных средах (Обзор) // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2001. – № 4. – С. 27–41. 3. Андрейків О.Є., Гембара О.В. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах. – К.: Наукова думка, 2008. – 344 с. 4. Рвачев В.Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения. – К.: Наук. думка, 1982. – 566 с. 5. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86). – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 525 с.

УДК 621.01

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИЛОВЫХ ПЕРЕДАЧАХ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ АЛГЕБРЫ

Морачковский О.К., докт. техн. наук, **Дружинин Е.И.**, канд. техн. наук, **Беломытцев А.С.**, канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)

The universal analytical method of modelling of dynamic processes in power transmissions of transport machines with the hydrostatic drive is presented. The method is based on using of matrix form for presenting general variation equation of mechanics and special system of computer algebra.

Введение. Силовые передачи (СП) транспортных машин с объемными гидроприводами (ОГ) и дифференциальными механизмами (ДМ), имеющие ряд преимуществ по сравнению с чисто механическими СП, прочно вошли в современную практику зарубежного и отечественного машиностроения [1-5]. Обычно ОГ в сочетании с ДМ используются в системах турбонаддува двигателей внутреннего сгорания, а также для обеспечения более высоких качественных показателей разворота транспортных средств [1]. Динамические процессы, имеющие

место в механической части СП и в жидкости, как рабочем теле ОГ, обладают широкими частотными спектрами, которые часто пересекаются, что приводит к дополнительным трудностям моделирования, связанными как с автоматизированным построением уравнений движения гидромеханических силовых передач (ГМСП), так и с анализом взаимного влияния жидкости и различных узлов СП.

Постановка проблемы. При рассмотрении класса дискретных моделей ГСМП, которые описываются системами обыкновенных дифференциальных уравнений, указанные выше трудности можно устранить, если использовать приведенные в [3, 4] модели инерционных, демпфирующих и упругих характеристик объемной гидропередачи (ОГП), а также выражения моментов, действующих на роторы гидромашин (ГМ) ОГП со стороны рабочей жидкости (РЖ). Необходимо отметить, что эти модели были получены на основе интегральных оценок инерционных, демпфирующих и упругих свойств ОГП с учетом их конструктивных особенностей. Кроме того, достоверность полученных результатов при использовании этих моделей гарантируется, когда допустимо не принимать во внимание влияние высокочастотных волн давлений и скоростей в магистралях ОГП на динамику остальной части СП. Поскольку дискретные модели ГСМП, как правило, имеют большое число степеней свободы и являются структурно сложными, то процесс безошибочного составления уравнений их движения без применения ЭВМ может оказаться проблематичным. С учетом изложенного, разработка и реализация аналитических алгоритмов описания и расчетов дискретных моделей ГМСП на основе специальной системы компьютерной алгебры является актуальной проблемой.

Цель статьи. Целью статьи является описание алгоритма составления уравнений движения дискретных моделей СП, описание инерционных, упругих, диссипативных и силовых свойств ОГП, аналитических и численных алгоритмов расчета динамического поведения ГМСП на примере СП с ОГП и ДМ.

Описание алгоритма. Аналитическое описание дискретных моделей ГМСП осуществляется в исходных данных в формульном виде на макроязыке специальной системы компьютерной алгебры, что позволяет автоматизировать построение уравнений движения в векторно-матричной форме общего уравнения механики. При этом считается, что дискретная модель полностью определяется совокупностью ее инерционных, диссипативных, упругих и силовых элементов. Введем в рассмотрение векторы значений этих элементов

$$\vec{J} = \{J_1, J_2, \dots, J_i\}, \vec{D} = \{D_1, D_2, \dots, D_k\}, \vec{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_l\}, \vec{P} = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}, \quad (1)$$

векторы их координат

$$\vec{\eta} = \{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_i\}, \vec{\theta} = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k\}, \vec{\xi} = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_l\}, \vec{\psi} = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_m\}, \quad (2)$$

а также вектор обобщенных координат $\vec{\zeta} = \{\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n\}$.

Кроме того, вводятся векторные функции (структуры)

$$\vec{f}_1 = \{f_{11}, f_{12}, \dots, f_{1i}\}, \vec{f}_2 = \{f_{21}, f_{22}, \dots, f_{2k}\}, \vec{f}_3 = \{f_{31}, f_{32}, \dots, f_{3l}\}, \vec{f}_4 = \{f_{41}, f_{42}, \dots, f_{4m}\}, \quad (3)$$

позволяющие выразить соответственно координаты инерционных, диссипативных, упругих и силовых элементов через обобщенные координаты

$$\vec{\eta} = \vec{f}_1(\vec{\zeta}), \vec{\theta} = \vec{f}_2(\vec{\zeta}), \vec{\xi} = \vec{f}_3(\vec{\zeta}), \vec{\psi} = \vec{f}_4(\vec{\zeta}), \quad (4)$$

Используя введенные величины, можно определить векторы различных сил (инерции, диссипации, упругости), необходимые для составления уравнений движения на основе принципа Даламбера-Лагранжа (общего вариационного уравнения механики), который будет иметь вид

$$(J\ddot{\vec{\eta}}, \delta\vec{\eta}) + (D\dot{\vec{\theta}}, \delta\vec{\theta}) + (C\vec{\xi}, \delta\vec{\xi}) = (\vec{P}, \delta\vec{\psi}), \quad (5)$$

где J, D, C - симметрические матрицы инерции, диссипации и упругости, размерность которых определяется соответственно размерностью векторов $\vec{J}, \vec{D}, \vec{C}$. При этом

$$\delta\vec{\eta} = \frac{\partial \vec{f}_1(\vec{\zeta})}{\partial \vec{\zeta}} \delta\vec{\zeta}, \delta\vec{\theta} = \frac{\partial \vec{f}_2(\vec{\zeta})}{\partial \vec{\zeta}} \delta\vec{\zeta}, \delta\vec{\xi} = \frac{\partial \vec{f}_3(\vec{\zeta})}{\partial \vec{\zeta}} \delta\vec{\zeta}, \delta\vec{\psi} = \frac{\partial \vec{f}_4(\vec{\zeta})}{\partial \vec{\zeta}} \delta\vec{\zeta}; \ddot{\vec{\eta}} = \ddot{f}_1(\vec{\zeta}), \dot{\vec{\theta}} = \dot{f}_2(\vec{\zeta}). \quad (6)$$

Введя обозначения для структурных матриц: инерции, демпфирования, упругости и силовых воздействий

$$\frac{\partial \vec{f}_j(\vec{\zeta})}{\partial \vec{\zeta}} = S_j, \quad j = \overline{1,4};$$

запишем (5) в виде

$$(J\ddot{\vec{\eta}}, S_1\delta\vec{\zeta}) + (D\dot{\vec{\theta}}, S_2\delta\vec{\zeta}) + (C\vec{\xi}, S_3\delta\vec{\zeta}) = (\vec{P}, S_4\delta\vec{\zeta}). \quad (7)$$

Воспользовавшись свойством сопряженности матриц S_1, S_2, S_3, S_4 , будем иметь

$$(S_1^T J\ddot{\vec{\eta}}, \delta\vec{\zeta}) + (S_2^T D\dot{\vec{\theta}}, \delta\vec{\zeta}) + (S_3^T C\vec{\xi}, \delta\vec{\zeta}) = (S_4^T \vec{P}, \delta\vec{\zeta}). \quad (8)$$

Для голономных систем вариации обобщенных координат $\delta\vec{\zeta}$, - произвольны, следовательно, из (8) получим систему дифференциальных уравнений в векторно-матричной форме

$$S_1^T J\ddot{\vec{\eta}} + S_2^T D\dot{\vec{\theta}} + S_3^T C\vec{\xi} = S_4^T \vec{P}. \quad (9)$$

Заменим векторы координат векторными функциями, определяющими структуры

$$S_1^T J\ddot{f}_1 + S_2^T D\dot{f}_2 + S_3^T C\vec{f}_3 = S_4^T \vec{P}. \quad (10)$$

Уравнение (10) является обобщенной математической моделью динамических процессов, имеющих место в дискретных моделях ГМСП. Для широкого класса систем, в том числе и для ГМСП, структуры $\vec{f}_1, \vec{f}_2, \vec{f}_3$ являются постоянными и линейными. С учетом этого уравнение (10) примет вид:

$$S_1^T JS_1\ddot{\vec{\zeta}} + S_2^T DS_2\dot{\vec{\zeta}} + S_3^T CS_3\vec{\zeta} = S_4^T \vec{P}. \quad (11)$$

Модель инерционных, упругих и диссипативных свойств ОГП. Поскольку на основных (установившихся) режимах работы СП с двигателями внутреннего сгорания крутильные колебания среди всех возможных являются наиболее интенсивными, то инерционные свойства ОГП целесообразно моделировать моментами инерции сосредоточенных масс ГМ. При этом они усредняются за один оборот роторов насоса и гидромотора, поскольку для широкого ряда моделей ГМ переменная составляющая не превышает 1-2% от среднего за оборот значения. Определение упругих свойств ОГП сводится к вычислению момен-

тов, действующих со стороны сжимаемой жидкости на сосредоточенные массы роторов насоса и гидромотора. При этом предполагается, что РЖ подчиняется закону Гука, полости сжатия, включающие в себя магистрали высокого и низкого давлений, а также приемные и отдающие камеры ГМ, в любой момент времени являются замкнутыми и разделены между собой перемычками распределителей объемных ГМ, а уравнение неразрывности потока РЖ всегда имеет место. С учетом приведенных замечаний, моменты, действующие со стороны сжимаемой РЖ, на роторы ГМ имеют вид

$$\begin{cases} M_H = C_{\Gamma}(tg\gamma_H \cdot \alpha_H - tg\gamma_M \cdot \alpha_M)tg\gamma_H \\ M_M = C_{\Gamma}(tg\gamma_M \cdot \alpha_M - tg\gamma_H \cdot \alpha_H)tg\gamma_M, \end{cases} \quad (12)$$

где γ_H, γ_M - углы наклона шайбы насоса и упорного диска гидромотора; α_H, α_M - обобщенные координаты, определяющие угловые перемещения роторов ГМ при крутильных колебаниях; C_{Γ} - эквивалентная жесткость РЖ, определяемая по формуле

$$C_{\Gamma} = [2r^4 R^2 z^2 (\chi_1 + \chi_2)] / V_0. \quad (13)$$

Здесь r, R, z - соответственно радиус плунжера, радиус разности осей цилиндров и количество плунжеров ГМ; V_0 - суммарный объем РЖ в полостях сжатия (высокого и низкого давлений).

Переходя к вопросу определения демпфирующих характеристик, необходимо отметить, что среди различных видов потерь мощности в ОГП (механических, объемных, гидравлических) учитывались только потери, связанные с трением движущихся частей ГМ (плунжер-цилиндр; ротор-распределительный диск; подпятники-упорный диск), поскольку именно они оказываются существенными при крутильных колебаниях. Кроме того, принимался во внимание тот факт, что ОГП обладают сравнительно слабыми демпфирующими характеристиками по сравнению с другими узлами СП, и что, следовательно, важными являются не зависимости изменения моментов сил трения на периоде, а только их интегральные оценки за цикл колебаний. Таким образом, демпфирующие свойства ОГП фактически оценивались величиной коэффициента эквивалентного вязкого трения, определяемого из условия равенства работы сил трения в парах ГМ и работы сил эквивалентного вязкого трения

$$\beta = 4(M_1 + M_2 + M_3) / \Phi \omega_B \pi \quad (14)$$

где Φ - амплитуда колебаний ротора ГМ; ω_B - частота возмущающего воздействия. M_1, M_2, M_3 - соответственно, приведенные к валу ГМ моменты сил трения в парах: плунжер-цилиндр, ротор-распределительный диск, подпятники-упорный диск, выражения для которых, сложным образом зависящие от конструктивных параметров ГМ и режимов работы ОГП, приведены в [4].

В качестве примера рассмотрим расчет свободных и вынужденных колебаний системы турбонаддува ДВС транспортного средства, включающую в себя ОГП, ДМ и три роликовых механизма свободного хода. Модель системы приведена на рис. 1.

$$\Phi_C = (1 + \alpha)\Phi_1 - \alpha\Phi_2; \quad \alpha = Z_3/Z_C;$$

$$\Phi_U = (1 + \beta)\Phi_1 + \beta\Phi_2; \quad \beta = Z_3/Z_C;$$

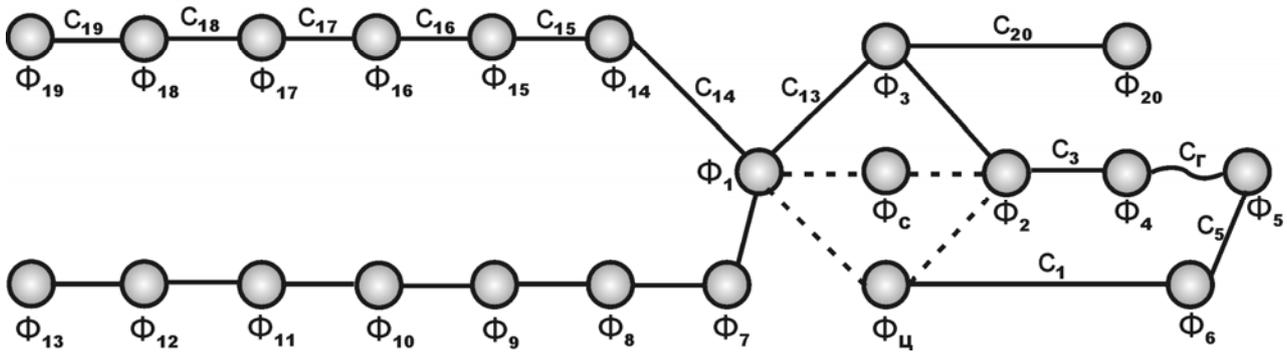


Рис. 1.

Модель представлена 20 степенями свободы. В качестве обобщенных координат выбраны углы поворота приведенных масс отдельных инерционных элементов ГСМП. Инерционных элементов – 34, упругих – 20, демпфирующих – 14, силовых – 12. На рисунке приведены соотношения между углами поворота 4-х звеньев ДМ (Φ_1 -водило; Φ_2 -эпицикл; Φ_C -сателлит; Φ_U -центральная шестерня). Пунктиром показана кинематическая связь между этими же звеньями. Z_3, Z_C - число зубьев эпицикла и сателлита. С целью экономии места значения конструктивных параметров ГСМП не приводятся. В таблице приведен фрагмент частотного спектра ГСМП (три частоты из двадцати), находящийся в диапазоне рабочих оборотов ДВС.

Таблица

№ п/п	Гц	рад/с	об/мин
2	15.198993	95.498090	911.939580
3	32.441925	203.838626	1946.515491
4	51.857877	325.832653	3111.472636

На рис. 2 представлена АЧХ инерционного и АЧХ упругого элементов ГСМП.

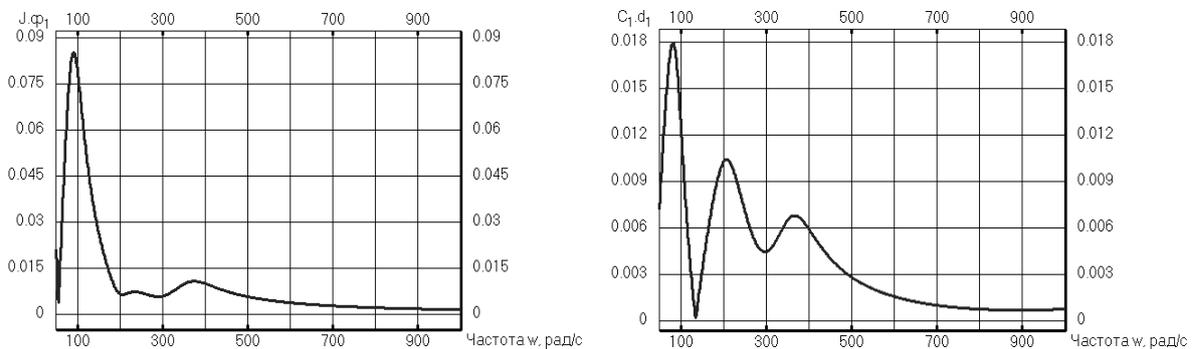


Рис. 2.

Выводы. В статье демонстрируется универсальность приведенного метода аналитического и численного моделирования динамики дискретных систем на примере силовых передач транспортных машин с объемным гидроприводом и дифференциальными механизмами.

Литература: 1. Александров Е.Е. и др. Автоматизированное управление гидрообъемными трансмиссиями и механизмами поворота гусеничных машин. – Харьков: ХГПУ, 1995. – 176 с. 2. Вейц В.Л., Кочура А.Е., Мартыненко А.М. Динамические расчеты приводов машин. – Л.: Машиностроение, 1971. – 352 с. 3. Дружинин Е.И., Штейнвольф Л.И. Динамические модели силовых цепей машин с гидрообъемными передачами. Теория механизмов и машин. – 1984, Вып. 36. – С. 95-101. 4. Дружинин Е.И., Штейнвольф Л.И. Определение демпфирующих характеристик аксиально-плунжерных гидрообъемных машин. Теория механизмов и машин. – 1984, Вып. 37. – С. 47-53. 5. Пасынков Р.М., Гайцгори М.М. Расчет гидрообъемных трансмиссий с учетом динамических нагрузок // Вестник машиностроения, 1967, №10. – С. 47-51.

УДК 539.3

АНИЗОТРОПНАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ ПЛАСТИН ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Морачковский О.К., докт. техн. наук, **Соболь В.Н.**, канд. техн. наук,
Львов И.Г., магистрант (г. Харьков, Украина)

The calculation method of material characteristics in creep law of composites materials are proposed on the base of averaging representative volume of creeping heterogeneous medium. Calculations results of creeping plates which are made from composites are given by use of the equations of condition the creeping initial - anisotropic homogeneous materials. The method is illustrated on an example of plates with a round aperture at a stretching.

Постановка и актуальность проблемы. Композиционные материалы представляют собой металлические и неметаллические матрицы (основы) с распределенными в них включениями (волокна, дисперсные частицы и др.), что позволяет эффективно использовать индивидуальные свойства составляющих композиции для придания необходимых свойств материалам [1–6]. Сплавы с направленной кристаллизацией эвтектических структур также представляют собой композиционные материалы [6]. Комбинируя объемное содержание компонентов, можно, в зависимости от назначения, получать композиционные материалы с требуемыми свойствами прочности, жаропрочности, жесткости, абразивной стойкости, а также создавать композиционные материалы с необходимыми магнитными, диэлектрическими, радиопоглощающими и другими специальными свойствами.

Области применения композиционных материалов многочисленны, например, авиационно-космическая, ракетная техника, энергетическое турбостроение и двигателестроение, оборудование химической промышленности. Расчеты на прочность, ползучесть и долговечность элементов конструкций из композиционных материалов актуальны для решения прикладных задач проектирования такой техники. Исследования в этой области ограничены полимерными композитами с вязкоупругими свойствами. Ползучесть металлических композитов мало исследована из-за сложности возникающих при этом проблем.

Принцип эффективной гомогенизации. Характеристики структурно – неоднородных сред можно изучить на основе подходов механики сплошных сред, в которых малый объем рассматривается как сплошное однородное тело. Ис-

пользованный в данной работе принцип гомогенизации композитов был изложен в работах в применении к задачам упругости и пластичности [1–5]. Гомогенный материал эквивалентный сплаву с направленной кристаллизацией эвтектических структур и волокнистых композитов – ортотропный. Теория ползучести ортотропных материалов рассмотрена в [6, 7].

Уравнения состояния ползучести гомогенных материалов. Принимая принцип эффективной гомогенизации, определим материальные характеристики свойств ползучести, используя усреднение законов ползучести по представительному объему гетерогенной среды композитных материалов.

Основные соотношения закона ползучести ортотропных материалов рассмотрены в статье [7]. Для трансверсально – изотропных материалов уравнения состояния повреждающегося вследствие ползучести материала в векторно-матричной форме запишутся так [8]:

$$\dot{\underline{c}} = b_{1111}^{(N+1)/2} \frac{\bar{\sigma}_2^{N-1}}{(1-\omega)^N} [\mathbf{B}] \underline{\sigma}, \quad \dot{\underline{\omega}} = d_{1111}^{k/2} \frac{\sigma_{*2}^{k-2}}{(1-\omega)^{k+S-1}} [\mathbf{D}] \underline{\sigma}, \quad (1)$$

$$\dot{\underline{\omega}} = d_{1111}^{k/2} \frac{\sigma_{*2}^k}{(1-\omega)^{k+S}}, \quad \omega(0) = 0, \quad \omega(t_*) = 1, \quad (2)$$

где $\dot{\underline{c}} = (\dot{c}_{11}, \dot{c}_{22}, 2\dot{c}_{12})^T$, $\underline{\sigma} = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12})^T$, $\dot{\underline{\omega}} = (\dot{\omega}_{11}, \dot{\omega}_{22}, 2\dot{\omega}_{12})^T$ – векторы скоростей деформаций ползучести, напряжений и скоростей повреждаемости; $\bar{\sigma}_2^2 = \underline{\sigma}^T [\mathbf{B}] \underline{\sigma}$, $\sigma_{*2}^2 = \underline{\sigma}^T [\mathbf{D}] \underline{\sigma}$ – инварианты напряжений;

$$[\mathbf{B}] = \begin{pmatrix} 1 & \beta_{12} & 0 \\ \beta_{21} & \beta_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 4\beta \end{pmatrix}, \quad \beta_{12} = -\frac{1}{2} b_{1111}, \quad \beta_{22} = \frac{b_{2222}}{b_{1111}}, \quad 4\beta = \frac{b_{1212}}{b_{1111}},$$

$$[\mathbf{D}] = \begin{pmatrix} 1 & \delta_{12} & 0 \\ \delta_{21} & \delta_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 4\delta \end{pmatrix}, \quad \delta_{12} = -\frac{1}{2} d_{1111}, \quad \delta_{22} = \frac{d_{2222}}{d_{1111}}, \quad 4\delta = \frac{d_{1212}}{d_{1111}}.$$

Экспериментальные данные по ползучести плоских образцов из листового материала Д16АТ при $T=275^\circ\text{C}$ получены в лаборатории прочности кафедры «Динамика и прочности машин» НТУ «ХПИ». Путем обработки экспериментальных данных установлены значения постоянных для закона ползучести вида (1,2), которые приведены в статье [8].

Ползучесть пластин с круглым отверстием при растяжении. В качестве примера рассмотрим ползучесть квадратной пластины листового материала Д16АТ при $T=275^\circ\text{C}$, со стороной $2b=0,2$ м с центральным круговым отверстием диаметром 0,02 м, растянутую

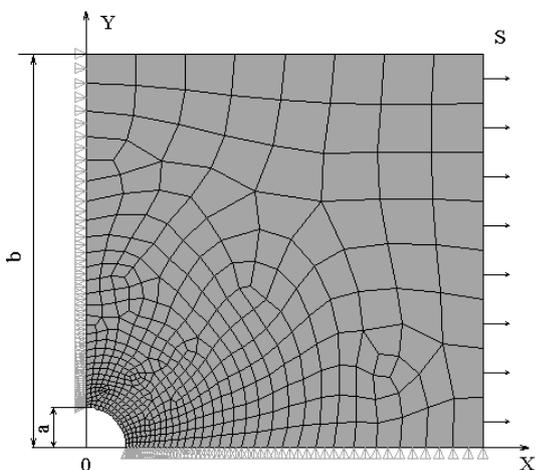


Рис. 1. Схема дискретизации пластины.

осевым усилием интенсивностью $S = 30$ МПа (рис. 1).

Используя ПК ANSYS, выполнены расчеты анизотропной ползучести пластины (тип конечных элементов: PLANE 183, 461 КЭ). Распределения осевых напряжений σ_{xx} и σ_{yy} в начальный момент времени и через 15 часов ползучести представлены на рис. 2 (пунктир – начальные распределения, треугольный маркер – через 15 часов). Следует отметить перераспределение напряжений σ_{xx} особенно на краю пластины возле отверстия.

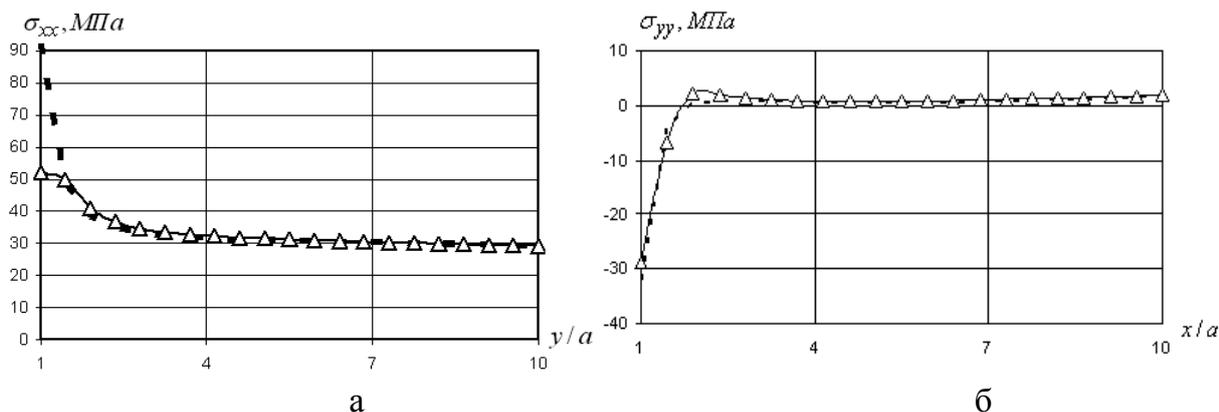


Рис. 2. Распределение напряжений: а – σ_{xx} вдоль оси $x=0$; б – σ_{yy} вдоль оси $y=0$ в пластине с круглым отверстием при растяжении.

Расчет характеристик ползучести однонаправленного композита. Рассмотрим периодически однонаправленный волокнистый композит (ВК), для которого известны характеристики упругости и закон ползучести материала волокна и матрицы:

$$E_v = 2 \cdot 10^5, \text{ МПа}, \nu_v = 0.3, \dot{c}_v = 2 \cdot 10^{-11} \sigma^3, c^{-1},$$

$$E_m = 2 \cdot 10^4, \text{ МПа}, \nu_m = 0.17, \dot{c}_m = 1 \cdot 10^{-11} \sigma^2, c^{-1}.$$

Приведем ВК к гомогенному трансверсально-изотропному материалу с плоскостью симметрии свойств – 12, нормальной к оси волокна – 3. Решением задач об упругом деформировании представительного объема ВК при растяжении в осевых направлениях – 1, 2, 3 и сдвиге в координатных плоскостях – 12, 23, 31, найдены средние значения характеристик упругости:

$$E_1 = E_2 = 1.013 \cdot 10^5, \text{ МПа}, E_3 = 1.608 \cdot 10^5, \text{ МПа}, G_{12} = 3.88 \cdot 10^4, \text{ МПа},$$

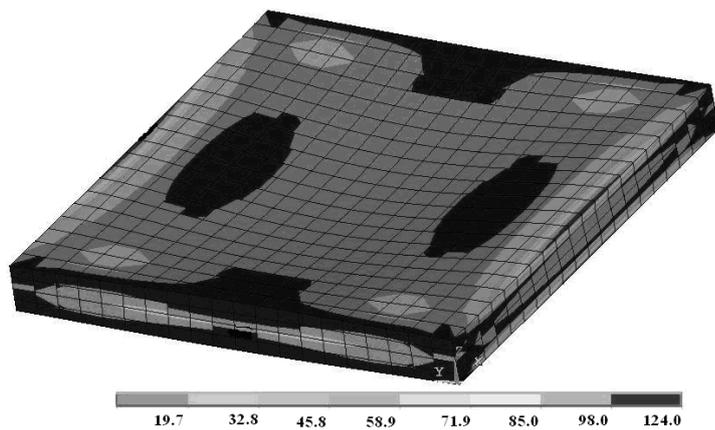
$$G_{23} = G_{31} = 4.514 \cdot 10^4, \text{ МПа}, \nu_{12} = 0.15, \nu_{23} = \nu_{31} = 0.18.$$

Решением задач деформирования при ползучести представительного объема ВК при растяжении в осевых направлениях – 1, 2, 3 и сдвиге в координатных плоскостях – 12, 23, 31, найдены средние значения характеристик закона ползучести ВК:

$$n = 3, b_{1111} = b_{2222} = 3 \cdot 10^{-9}, b_{3333} = 1.8 \cdot 10^{-9}, b_{1212} = 7.7 \cdot 10^{-8}, b_{2323} = b_{3131} = 6.68 \cdot 10^{-8},$$

$$b_{1122} = -6.3 \cdot 10^{-8}, b_{1133} = b_{2233} = -5.2 \cdot 10^{-8}, \text{ Па}^{\frac{2n}{n+1}} c^{-\frac{2}{n+1}}$$

Ползучесть пластин из однонаправленных волокнистых композитных материалов при поперечном изгибе. В качестве примера рассмотрим ползучесть



$\sigma_y, \text{МПа}$

Рис. 3. Поле интенсивности напряжений в плите через час ползучести.

два других – жестко. На рис. 3 представлено распределение интенсивности напряжений в плите через час ползучести.

Выводы. В работе предложен подход к расчетам на ползучесть тел из композитных материалов, основанный на принципе гомогенизации структурно-неоднородных материалов. Конкретизированы уравнения состояния анизотропной ползучести композитных материалов, приведенных к гомогенным ортотропным материалам. Материальные постоянные в уравнениях состояния получены усреднением кривых ползучести композита на представительном объеме с характерным размером структурной неоднородности. Расчетами определены материальные характеристики свойств упругости и ползучести однонаправленных волокнистых композитов. Рассмотрены конечно-элементные расчеты в ПК ANSYS анизотропной ползучести пластин с отверстием и плит из композитных материалов. Приведены расчетные данные ползучести при поперечном изгибе пластин из однонаправленных волокнистых композитных материалов. В дальнейшем, в рамках предложенного подхода, следует рассмотреть влияние повреждаемости вследствие ползучести композитных материалов и получить оценки долговечности разных элементов конструкций из композитных материалов, эксплуатирующихся в условиях ползучести.

Литература: 1. Ванин Г.А. Микромеханика композиционных материалов. – К.: Наук. думка, 1985. – 304 с. 2. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. – 336 с. 3. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. – М.: Мир, 1982. – 336 с. 4. Макарова И.С., Сараев Л.А. Теория упругопластического деформирования произвольно армированных композитов // Прикладная механика и техническая физика, 5, 1991 – 120 с. 5. Аношкин А.Н. Неупругое деформирование однонаправленных композитов при продольном сдвиге // Математическое моделирование систем и процессов, № 3. – 1995. – С. 4-10. 6. Johnson A.F. Creep characterization of eutectic composites: //Comportement mecanique des solides anisotropes / Colloques interrektionaux du CNRS, 295, 1982. - pp.775-788. 7. Морачковский О.К., Львов И.Г. Метод определения гомогенных свойств анизотропной ползучести композитных материалов / Труды 14-й Международной научно-технической конференции “Физические и компьютерные технологии”. – Харьков: ХНПК “ФЕД”. – 2008. – С. 112-116. 8. Морачковский О.К., Пасынок М.А. Исследование влияния на ползучесть материалов приобретенной анизотропии вследствие предварительной ползучести // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ, Вып.27, 1998. – С. 197-203.

квадратной плиты $a \times b \times h = 1 \times 1 \times 0.1, \text{ м}^3$, изготовленной из рассмотренного выше ВКМ, при поперечном изгибе под действием равномерного поперечного давления - 2 МПа. Используя ПК ANSYS и два типа конечных элементов: SOLID 186 (1600 КЭ) и SHELL 181 (400 КЭ), расчеты анизотропной ползучести выполнены для плиты, два противоположных края которой закреплены шарнирно, а

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ И
РАЗРУШЕНИЯ ЗАМКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЛОПАТОК ГТД**

Анищенко Г.О., канд. техн. наук, **Морачковский О.К.**, докт техн. наук
(г. Харьков, Украина)

The method for numerical analysis of creep and fracture of the fur-tree lock of connection of shovels of aviation gas turbine engines is given. The results of durable strength numerical investigation for second stage of gas turbine blade's root are presented.

Лопатки компрессоров и турбин и их замковые соединения работают в сложных силовых и температурных условиях и относятся к числу наиболее ответственных деталей газотурбинного двигателя. Одной из важных здесь является проблема исследование причин разрушения отдельных узлов и агрегатов турбомашин, требующая усовершенствования расчетов их на ползучесть и длительную прочность.

Главной причиной разрушения лопаток ГТД (61% отказов) является их недостаточная прочность и процессы накопления повреждений вследствие ползучести и усталости [1]. При этом 9% разрушений лопаток и их соединений связано с недопустимыми деформациями и статическим разрушением, а 42% разрушений и трещин вызвано влиянием переменных напряжений.

Лопатки турбомашин и их замковые соединения в процессе эксплуатации находятся под действием центробежных сил и моментов от центробежных сил, возникающих при смещении центров тяжести поперечных сечений лопатки по отношению к радиусу диска, моментов газовых усилий в осевой плоскости и в плоскости вращения ротора. Кроме того, газовые турбины работают в сложных температурных условиях, что способствует развитию в лопатках, дисках и их соединениях деформаций ползучести. Для газотурбинных двигателей типичны такие рабочие режимы, когда лопатки и их замковые соединения испытывают действие высокочастотных циклических нагрузок, вызванных неравномерностью газового потока.

Экспериментальные исследования по ползучести весьма затруднены [3], поэтому расчетные исследования напряженно – деформированного состояния элементов энергетических машин при ползучести имеют большое значение для достоверной оценки их длительной прочности при циклических воздействиях. Кроме того, методы расчеты на длительную прочность являются важной составной частью в проектировании турбин.

До середины прошлого столетия расчеты на длительную прочность лопаток и их соединений проводились отдельно на статическую ползучесть и усталость. В традиционных расчетах методы базировались на подходах, сформировавшихся в период становления теории ползучести, и заключались в определении напряженного установившегося состояния при стационарном нагружении для оценки времени до разрушения по критерию длительной прочности [2, 4, 5]. В этих расчетах действие циклического нагружения не учитывалось. При этом в расчетах на усталость использовались модели усталостного разрушения, а влияние статической нагрузки учитывалось по «граничным» диаграммам [1]. Однако, как отмечалось ранее, высокотемпературная ползучесть лопаток ГТД и их замковых соединений – это сложный процесс, происходящий под действием не только значительных стационарных нагрузок, вызванных центробежными силами, но и при циклическом

нагрузении, вызванном в основном неравномерностью газового потока.

Предложенные и обоснованные в работах [5–9] методы расчета на длительную прочность основаны на современных представлениях о ползучести и разрушении тел, включает достижения в области континуальной механики повреждаемости, и расширяют возможности расчетов на ползучесть, в частности, для случая высокочастотного циклического нагружения.

В рамках этого подхода процессы микроповреждений при ползучести описываются соотношениями, ранее предложенными Работновым и Качановым. При рассеянных микроповреждениях параметр повреждаемости $\omega = \omega(x, t)$ принимается скалярной функцией координат точек тела и времени. На стадии скрытого разрушения $0 \leq t < t_c$ (t_c – время окончания скрытого разрушения) в точках конструктивного элемента происходит накопление повреждаемости от $\omega(x, 0) = 0$ до $\omega(x, t_c) = \omega_*$ в момент окончания скрытого разрушения. Обычно принимают $\omega_* \cong 1$.

В работе [8] на основании теоретических подходов и численных методов расчета на ползучесть и повреждаемость в плоских конструктивных элементах машин при совместном действии статических и циклических нагрузок, представленных ранее в работах [6, 7], выполнены расчеты ползучести и длительной прочности елочного замкового соединения ГТД. Здесь приведены результаты численного анализа напряженно-деформированного состояния, накопления повреждаемости и разрушения вследствие динамической ползучести при температуре 700°C для елочного замкового соединения лопатки второй ступени ГТД из жаропрочного сплава ЭИ-617 (ХН70ВМТЮ).

Расчетами установлено время до окончания скрытого разрушения, которое оказалось равным $t_c = 6760$ часов при статическом нагружении центробежными усилиями $\sigma_0 = 110$ МПа при температуре 700°C . Коэффициент концентрации напряжений во впадине первого зуба достигает 3,5. Во всех зубьях максимальные напряжения локализуются на некотором расстоянии от дна впадины, а по мере удаления от корня лопатки их значения уменьшаются. Через 100 часов работы вследствие установления ползучести отмечается снижение уровня максимальных напряжений во впадинах всех зубьев. На этой стадии влияние поврежденности весьма мало. Затем в замковом соединении происходит процесс накопления повреждаемости при существенном перераспределении напряжений по телу замка. Напряжения перед разрушением не соответствуют установившимся, как это предполагается в традиционных методах расчета [2, 4].

Зоны с максимальными значениями параметра повреждаемости, локализованы вблизи впадин каждого из зубьев замкового соединения. Так, например, в момент окончания скрытого разрушения значения ω_{max}^i (i – номер зуба) оказались следующими: $\omega_{max}^1 = 0,994$, $\omega_{max}^2 = 0,426$, $\omega_{max}^3 = 0,359$, $\omega_{max}^4 = 0,217$, $\omega_{max}^5 = 0,128$. Разрушение соединения начинается во впадине первого зуба, где параметр повреждаемости достигает наибольшего значения, равного предельному – $\omega_* \cong 1$. Эти данные согласуются с расчетными данными работы [9], в которой проведено численное исследование ползучести елочного хвостовика лопатки авиационного ГТД на основе полуаналитического метода конечных элементов

В работе [9] на основании численных методов расчета на ползучесть и

повреждаемость пространственных элементах елочного хвостовика лопатки авиационного ГТД при статических нагрузках, представлены распределения повреждаемости в момент начала разрушения ($\omega^1_{max}=0,94$; $\omega^2_{max}=0,372$; $\omega^3_{max}=0,223$; $\omega^4_{max}=0,074$). Здесь приведены результаты численного анализа напряженно-деформированного состояния, накопления повреждаемости и время до начала разрушения составило 1580 часов. Расположение зон разрушения совпадает с [8]. Решение задачи в пространственной постановке с учетом совместного действия изгибающих и растягивающих усилий уменьшает значение времени до начала разрушения на 25%.

В работе [8] также рассмотрены результаты влияния циклической нагрузки $P_a \sin \Omega t$, наложенной на центробежные силы P_0 . Моделирование динамической ползучести выполнялось для различных значений параметра асимметрии цикла нагружения $A=P_a / P_0$: 0,25; 0,3; 0,5. Установлено, что время до окончания скрытого разрушения при наложении циклической составляющей $P_a = 0,25P_0$ значительно меньше, чем при действии статического нагружения $P=P_0$ ($t_c=2330$ ч и $t_c=6760$ ч соответственно). заметно увеличивается.

Распределение интенсивности напряжений σ_i для статического и циклического нагружения различной составляющей внешней нагрузки имеют существенные различия перед разрушением. Вблизи оси замкового соединения значения σ_i изменяются в диапазоне от 130–180 МПа до 100-150 МПа, уровень максимальных значений σ_i снижается 320–390 МПа до 180-230 МПа. При динамической ползучести во впадине первого зуба σ_i снижаются на меньшую величину, чем при статической ползучести, причем, чем больше величина P_a , тем большие значения $\sigma_i(t_c)$ в окрестности впадины.

Сравнительные данные проведенных исследований сведены в таблицу, анализ которой позволяет сделать следующие выводы. При циклическом нагружении замкового соединения вдали от резонанса большее значение на время окончания скрытого разрушения t_c оказывает величина параметра асимметрии цикла внешней нагрузки A . Наложение даже незначительной амплитудной составляющей $P_a = 0,1P_0$ сокращает время $t_c = 6760$ часов, как было установлено расчетами статической ползучести с нагрузкой $P=P_0$ ($A=0$), до 5120 ч ($A=0,1$). Увеличение величины амплитудной составляющей, например до $P_a = 0,25P_0$ уменьшает время t_c примерно в 3 раза, а до $P_a = 0,5P_0$ – почти в 12 раз.

A	P= P ₀ (1+A)			P= P ₀ (1+Asin Ωt)		
	σ _y ^{max} (0), МПа	σ _y (t _c), МПа	t _c , ч	σ _y ^{max} (0), МПа	σ _y (t _c), МПа	t _c , ч
0	407,7	34,3	6760	407,7	34,3	6760
0,1	448,5	27,2	2690	407,7	22,03	5120
0,25	509,6	209,5	700	407,7	73,88	2330
0,5	611,6	457,6	122	407,7	218	534

Установлено, что замена расчетов на динамическую ползучесть расчетами на статическую ползучесть с нагрузкой, равной максимальному ее значению

в цикле, приводит к снижению расчетного времени окончания скрытого разрушения рассматриваемой конструкции. Так, например, при статической нагрузке $P=1,1 P_0$, равной максимальной за цикл при $A=0,1$, время t_c меньше примерно в 2 раза, чем при действии соответствующей циклической нагрузки, при $P=1,25 P_0$ - в 3.3 раза, а при $P=1,5 P_0$ - уже в 4,4 раза.

Таким образом, влияние циклического нагружения на напряженно-деформированное состояние и длительную прочность елочного замкового соединения лопаток турбомашин даже при небольших значениях коэффициента асимметрии цикла внешней нагрузки A весьма существенно. При этом, замена расчета динамической ползучести рассматриваемой детали при ее циклическом нагружении на расчет статической ползучести не является адекватной для оценки длительной прочности, так как приводит к завышению значений узловых перемещений и снижению времени до окончания скрытого разрушения.

Литература: 1. Несущая способность рабочих лопаток ГТД при вибрационных нагружениях / Трощенко В.Т., Матвеев В.В., Грязнов Б.А. и др. – К.: Наукова думка, 1981. – 316 с. 2. Мавлютов Р.Р. Концентрация напряжений в элементах машиностроительных конструкций. – М.: Наука, 1981. – 141 с. 3. Сухинин В.П. Расчет нагрузочных и деформационных характеристик елочных хвостовых соединений рабочих лопаток паровых турбин. – Пробл. машиностроения, 2005. – Том.8, № 1. – С. 38-46. 4. Малинин Н.Н. Расчеты на ползучесть элементов машиностроительных конструкций // Библ. расчетчика. – М.: Машиностроение, 1981. – 221 с. 5. Морачковский О.К. О нелинейных задачах ползучести тел при воздействии быстро осциллирующего поля // Прикладная механика, 1992.- Т.28. – №8. – С. 17-23. 6. Бреславский Д.В., Морачковский О.К. Нелинейная ползучесть и разрушение плоских тел при высокочастотном циклическом нагружении // Прикладная механика. – 1998. – Том 34, №3. – С. 97-103. 7. Анищенко Г.О., Бреславский Д.В. Ползучесть и повреждаемость в телах при плоском напряженном состоянии // Динамика и прочность машин, 1997. – Харьков: ХГПУ, Вып. 55. – С. 23-32. 8. Анищенко Г.О., Бреславский Д.В., Морачковский О.К. Ползучесть и длительная прочность елочного замкового соединения ГТД при совместном действии статических и циклических нагрузок // Проблемы прочности, 1998. – №19 (331). – С. 34-40. 9. Баженов В.А., Гуляр А.И., Майборода Е.Е., Пискунов С.О. Численное исследование ползучести элементов паровых и газовых турбин // Вибрации в технике и технологиях, 2001. – №5(21). – С. 109-111.

УДК 539.3

АНАЛИЗ ЛОКАЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛОПАТОЧНОГО АППАРАТА ТУРБОМАШИН С ПОВРЕЖДЕНИЯМИ

Воробьев Ю.С., докт. техн. наук, **Чугай М.А.,** канд. техн. наук
(г. Харьков, Украина)

The work presents an analysis of vibrations of damaged turbine blading. The modeling of objects was spent on the basis of the three-dimensional approach of a finite elements method with the use of the special singular finite elements that account for the stress localization affect in the crack apex. The influence of the different locations of damages on the natural frequencies, displacement forms and stress intensity is analyzed.

Для современного газотурбостроения обеспечение вибрационной прочности лопаточного аппарата является одной из наиболее важных задач. При этом основную опасность представляет локализация вибрационных напряжений, которая вызывается сложной конструктивной формой объектов, технологически-

ми и эксплуатационными факторами [1]. Локализация и концентрация вибрационных напряжений наиболее явно проявляются в местах повреждений рабочих лопаток. Для выявления изменения форм перемещений и напряжений вследствие повреждений, локализации напряжений в устье трещины целесообразно использовать трехмерные конечноэлементные модели. Большинство исследований посвящено колебаниям отдельных объектов с трещиной. Поэтому представляет интерес задача о колебаниях системы лопаток, объединенных в пакет или рабочее колесо, с повреждениями нескольких из них. Трехмерные конечноэлементные модели позволяют варьировать место расположения трещины и ее размер, а также рассматривать особенности колебаний элементов лопаточного аппарата при повреждении различных лопаток.

Области максимальных напряжений в элементах лопаточного аппарата могут быть проанализированы с целью смягчения возникающего в них напряженного состояния. Для такого анализа наиболее эффективным является метод численного эксперимента. Численным методом исследуется конструкция с трещиной и без трещины с варьированием геометрической формы отдельных элементов, а также изменением условий нагружения в расчетном узле. Такой метод анализа стал возможен благодаря широкому практическому применению численных методов расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций, в частности метода конечных элементов (МКЭ).

Для исследования количественных и качественных характеристик полей вибрационных напряжений в пакетах лопаток и рабочих колесах турбомашин разработаны расчетные модели элементов лопаточного аппарата на основе трехмерного подхода в сочетании с МКЭ.

Виды повреждений в лопатках газотурбинного двигателя включают в себя: забоины, коррозионные и эрозионные повреждения, повреждения типа химических неоднородностей и разного происхождения трещины. Большая часть повреждений моделируются клинообразными вырезами без учета контакта берегов. Это предположение является явным упрощением, но согласно исследованиям в этом направлении, оно вызывает повышение уровня концентрации напряжений в вершине трещины, что дает запас прочности. Поэтому такое предположение часто используется при анализе напряженно-деформированного состояния (НДС) в зоне повреждения.

Для построения конечноэлементных моделей конструкции с повреждениями, включая трещину, существуют несколько подходов. Первый заключается в существенном сгущении сетки элементов в вершине трещины, что очень усложняет моделирование сингулярного характера напряжений. Второй подход заключается в использовании специальных элементов, содержащих трещину. Они требуют предварительного знания коэффициентов интенсивности напряжений, которые обычно заранее неизвестны. Кроме того, характер изменения напряжений является заданным и не существует теоретического обоснования сходимости результатов. Наиболее корректный подход заключается в применении специальных элементов, которые моделируют сингулярность напряжений и деформаций в вершине трещины (сингулярные элементы). Эти элементы отображают особенности НДС в окрестности вершины трещины.

Для построения конечноэлементных моделей в работе использовался изопараметрический 20-узловой квадратичный конечный элемент, который может вырождаться в 15-узловой конечный элемент путем совмещения трех узлов одной стороны. Для обеспечения особенностей распределения напряжений типа $O(r^{-1/2})$ необходимо сдвинуть промежуточные узлы изопараметрического 15-узлового элемента на четверть длины стороны по направлению к вершине трещины (рис. 1).

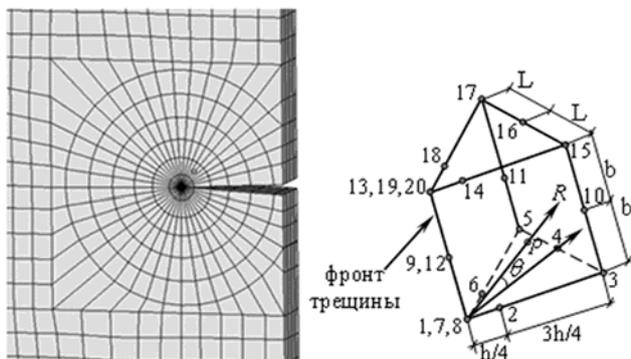
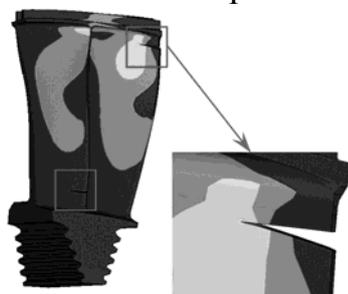


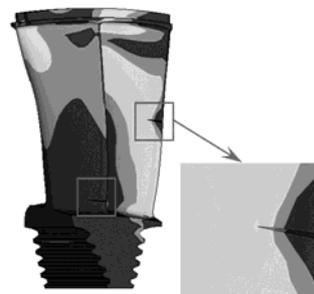
Рис. 1. Конечноэлементная модель образца с повреждением и вид специального конечного элемента.

Повреждения рассматриваются как вырез, имеющий границы (берега), которые не контактируют при любых деформациях конструкции. Особое внимание уделяется областям, где вследствие конструктивных особенностей возникают максимальные напряжения, и возрастает вероятность возникновения повреждений. На рис. 2 – 4 представлены распределение интенсивностей вибрационных напряжений и частоты при колебаниях пакета лопаток с различным расположением трещины на левой и правой лопатках.



$f_4 = 3551,5 \text{ Гц}$

Рис. 2. Поля интенсивностей напряжений при колебаниях пакета лопаток по четвертой форме с расположением трещины на левой (в корневом сечении) и правой (под полкой) лопатках.



$f_2 = 2283,9 \text{ Гц}$

Рис. 3. Поля интенсивностей напряжений при колебаниях пакета лопаток по второй форме с расположением трещины на левой (в корневом сечении) и правой (посередине) лопатках.

Полученные таким образом элементы могут обладать особенностью вида $O(r^{-1/2})$ для напряжений, они достаточно хорошо описывают изменения напряжений и перемещений в вершине трещины, полностью совместимы с обычными квадратичными элементами и отображают деформацию тела как целого.

Численный анализ. Исследования колебаний пакетов лопаток показало, что при объединении лопаток

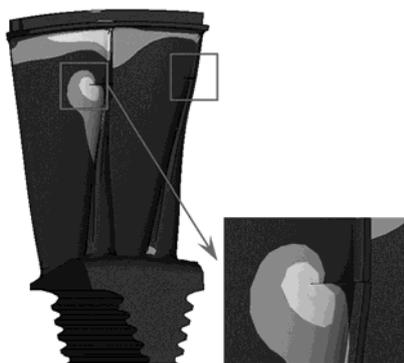


Рис. 4. Поля интенсивностей напряжений при колебаниях пакета лопаток по первой форме с расположением трещины на левой и правой лопатках.

В таблице 1 приведены частоты собственных колебаний пакета лопаток без повреждения и с различным расположением повреждения.

В табл. 1 используются следующие обозначения: положение 1 – повреждения на правой лопатке пакета под полкой и на левой в корневом сечении на входных кромках (рис. 2); положение 2 – повреждения на правой лопатке посередине и на левой в корневом сечении на входных кромках (рис. 3); положение 3 – повреждения на левой и правой лопатках в верхней трети пера лопатки на выходных кромках (рис. 4).

Таблица 1

Частоты при колебаниях пакета лопаток с различным расположением повреждений, Гц

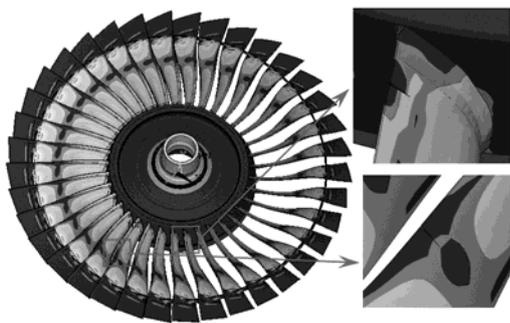
№ частоты	Без повреждения	Положение 1	Положение 2	Положение 3
1	1509,0	1330,7	1328,7	1256,4
2	2572,1	2294,8	2283,9	2027,7
3	3471,8	3009,9	3001,5	2699,4
4	4035,1	3551,5	3574,9	3563,3
5	4678,8	4122,4	4143,5	4141,0
6	6215,9	5455,9	5549,5	5509,5
7	6312,8	5556,7	5560,8	5580,3
8	7168,9	6342,4	6391,0	5960,4
9	8030,0	7148,1	7148,6	6525,9
10	9557,6	8251,9	8423,1	8141,6

Также в работе рассмотрены колебания рабочего колеса с повреждениями различного местоположения на нескольких лопатках. Рассмотрены повреждения на лопатках рабочего колеса, где они были обнаружены при натурных испытаниях [2].

На рис. 5 приведено распределение интенсивностей напряжений при колебаниях рабочего колеса с двумя трещинами на 15 (в нижней трети пера лопатки) и 19 (посередине) лопатках по первой форме.

Результаты исследования. Использование трехмерных конечно-элементных моделей обеспечило возможность детального анализа вибрационной прочности элементов лопаточного аппарата с повреждениями. Упрощение модели снижает точность определения зон локализации напряжений.

Разработана методика оценки влияния повреждений в системе лопаток на собственные частоты, формы перемещений и локализацию вибрационных напряжений.



$f_1 = 103,5 \text{ Гц}$

Рис. 5. Поля интенсивностей напряжений при колебаниях по первой форме с трещинами на 15 лопатке (в нижней трети пера лопатки) и на 19 лопатке (посередине).

При появлении повреждения наблюдается существенная локализация напряжений вблизи вершины трещины. Частоты колебаний изменяются, но незначительно. Меняется картина распределения интенсивностей напряжений. Показано влияние расположения повреждения на вибрационные характеристики и локализацию напряжений вблизи выреза.

Результаты данной работы могут использоваться для диагностики. Например, сравнивая формы колебаний эталонной лопатки без повреждений и экспериментальной, можно судить о наличии или отсутствии дефектов в ней [3]. Анализ локализации напряжений с учетом повреждений и без них позволяет выработать рекомендации по снижению уровня вибрационных напряжений в местах, представляющих опасность в случае возможных повреждений, за счет перераспределения интенсивностей напряжений. Знание картины распределения вибрационных напряжений и их локализации может оказаться полезным при выборе вариантов как отдельных лопаток, так и их систем.

Создана трехмерная модель с конечными элементами, отражающими сингулярность НДС в вершине трещины типа $O(r^{-1/2})$ для напряжений и $O(r^{1/2})$ для перемещений. Разработана методика оценки влияния повреждений в системе лопаток на собственные частоты, формы перемещений и локализацию вибрационных напряжений.

Создана трехмерная модель с конечными элементами, отражающими сингулярность НДС в вершине трещины типа $O(r^{-1/2})$ для напряжений и $O(r^{1/2})$ для перемещений. Разработана методика оценки влияния повреждений в системе лопаток на собственные частоты, формы перемещений и локализацию вибрационных напряжений.

Литература: 1. К определению вибрационных характеристик стержня с закрывающейся трещиной при изгибных колебаниях / В.В. Матвеев, А.П. Бовсуновский // Проблемы прочности. – 2000. – № 3. – С. 5-23. 2. Исследование динамических процессов при флаттере лопаток с использованием метода прони / О.Б. Балакшин, Б.Г. Кухаренко, А.А. Хориков // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – №10(46). – С. 40-44. 3. Вернигор В.Н. Модальный анализ механических колебаний упругих систем / В.Н. Вернигор, А.Л. Михайлов. – Рыбинск, 2001. – 288 С.

УДК 539.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ «РАЗДАЧЕ» ТРУБ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Бондарь С.В., канд. техн. наук, **Лавинский Д.В.**, канд. техн. наук
(г. Харьков, Украина)

The method and results of calculation of magnetic pressure for pulse-magnetic stamping of rectangular pipes are presented.

Введение. Современное машиностроение развивается с использованием прогрессивных технологий. Совершенствование современного обрабатывающего производства происходит преимущественно с использованием безотходных технологий. К таким технологиям относится магнитно-импульсная штамповка

(МИШ). При разработке конкретных операций МИШ первоначально следует решать задачу о распределении магнитного поля в материале заготовки с целью определения магнитного давления. В данной статье рассматривается вопрос определения магнитного давления при «раздаче» труб прямоугольного сечения.

Актуальность и анализ состояния проблемы. В сборочных операциях элементов механических рамных конструкций в интегральном смысле можно вычлени такие производственные операции как "обжим", "раздача" и их комбинации. Операция "обжим" подразумевает деформирование внешнего элемента по размерам внутреннего в сборной конструкции. При "раздаче" наоборот внутренний элемент деформируется вплоть до жёсткой фиксации во внутренней полости внешнего элемента [1, 2]. Вышеперечисленные составляющие сборочных операций хорошо известны и достаточно отработаны при магнитно-импульсной сборке конструкций из элементов с цилиндрической симметрией. Здесь возбуждаемые силы давления практически равномерно распределены по периметру сочленяемых деталей, что обеспечивает, соответственно, однородную фиксацию в соединениях.

В случаях, когда речь идёт о сборке каких-либо конструкций из полых трубчатых заготовок с прямоугольной формой поперечного сечения, известные технические решения оказываются не работоспособными. Во-первых, нарушение круговой симметрии приводит к неоднородности в распределении сил магнитного давления. Во-вторых, угловые зоны, обладающие значительно более высокой жёсткостью, наименьшим образом подвержены каким либо деформациям. Наибольшие силовые воздействия и, соответственно, деформации испытывают боковые стенки сочленяемых профилей. Таким образом, при соединении элементов конструкций из полых труб с прямоугольной формой поперечного сечения на первый план выходит требование превалирующего силового воздействия на угловые зоны деформируемых профилей.

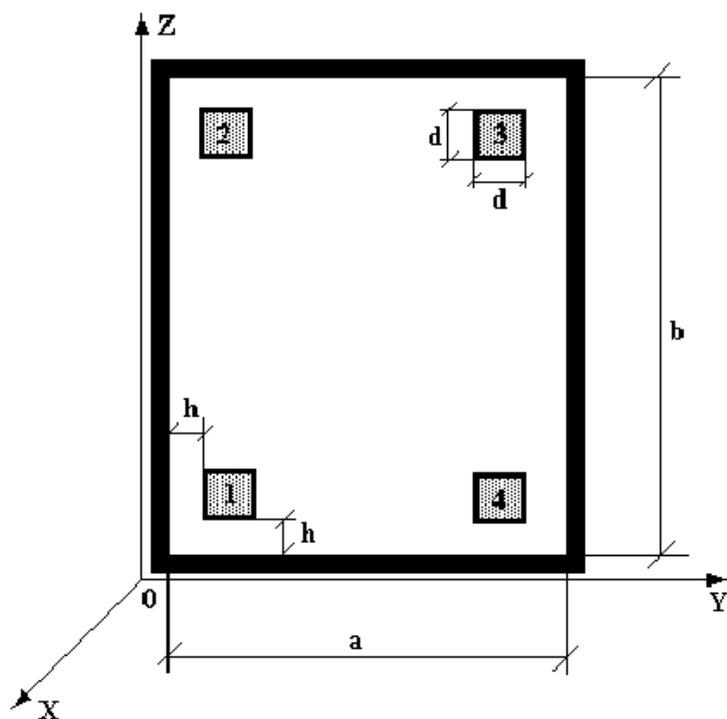


Рис.1. Расчетная модель.

Рассмотрим задачу определения магнитного давления при «раздаче» трубы прямоугольного сечения. Для этого применим конструкцию из протяжённых одновитковых соленоидов, размещённых внутри трубы компланарно плоскостям противоположных стенок так, что их длинные токопроводы параллельны и проходят вдоль угловых изгибов прямоугольного профиля. Схематически, предлагаемая индукторная система в поперечном сечении показана на рис. 1. Проводники, помеченные цифрами 1, 2,

3 и 4, – это протяжённые токопроводы витков. Их поперечное сечение – квадрат со стороной d . Углы в изгибах полой металлической трубы приближаются к $\approx \pi/2$. Одновитковые соленоиды прямоугольной формы выполнены из проводников квадратного сечения $d \times d$. Они обладают достаточно большой протяжённостью в измерении, соответствующем оси OX , так что $\partial/\partial x = 0$. Электропроводность обрабатываемого металла и действующие рабочие частоты настолько высоки, так что допустимо приближение резкого поверхностного эффекта [1, 2]. По токопроводам витков, параллельных оси OX , протекает один и тот же по величине ток $I_x(t) = I(t)$ (t – время в сек.).

Принятые допущения позволяют считать, что в рассматриваемой системе возбуждаются нетривиальные компоненты вектора напряжённости электромагнитного поля: $E_x(t, y, z) \neq 0$, $H_y(t, y, z) \neq 0$, $H_z(t, y, z) \neq 0$.

Из допущения о резком поверхностном эффекте следует, что на поверхностях стенок металлической трубы касательная составляющая вектора напряжённости электрического поля обращается в нуль, то есть $E_x(t, y, \{z = 0, b\}) = E_x(t, \{y = 0, a\}, z) = 0$. По аналогии с решениями задач о процессах в одновитковых индукторных системах с тонкостенными проводниками, рассмотренными в монографиях [3, 4], запишем уравнения Максвелла для компонент вектора поля, преобразованных по Лапласу с учётом нулевых начальных условий во внутренней полости между взаимно ортогональными стенками металлической трубы ($y \in [0, a]$, $z \in [0, b]$):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H_z(p, y, z)}{\partial y} - \frac{\partial H_y(p, y, z)}{\partial z} = j_x(p, y, z), \\ \frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial z} = -p\mu_0 H_y(p, y, z), \\ \frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial y} = p\mu_0 H_z(p, y, z), \end{array} \right. \quad (1)$$

где p – параметр интегрального преобразования Лапласа, $j_x(p, y, z)$ – плотность стороннего тока – тока в, $j_x(p, y, z) = \left(\frac{I(p)}{d^2}\right) \cdot \sum_{i=1}^4 \delta_i \cdot f_i(y, z)$, $I(p) = L\{I(t)\}$.

После выполнения необходимых тождественных преобразований получаем, что

а) на горизонтальных стенках трубы (соответственно рис.1), $z = 0$,

$$H_y(p, y, z = 0) = \left(\frac{I(p) \cdot 16}{\pi \cdot b \cdot d^2}\right) \sum_{m, n=1}^{\infty} \frac{f_1(m, n)}{\left[\left(\frac{\pi \cdot m}{b}\right)^2 + \left(\frac{\pi \cdot n}{a}\right)^2\right] \cdot n} \cdot \left[\delta_1 + (-1)^{m+1} \delta_2 + (-1)^{m+n} \delta_3 + (-1)^{n+1} \delta_4\right] \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n}{a} \cdot y\right), \quad (2)$$

б) на вертикальных стенках трубы (соответственно рис.1), $y = 0$,

$$H_z(p, y=0, z) = - \left(\frac{I(p) \cdot 16}{\pi \cdot a \cdot d^2} \right) \sum_{m,n=1}^{\infty} \frac{f_1(m,n)}{\left[\left(\frac{\pi \cdot m}{b} \right)^2 + \left(\frac{\pi \cdot n}{a} \right)^2 \right] \cdot m} \cdot \left[\delta_1 + (-1)^{m+1} \delta_2 + (-1)^{m+n} \delta_3 + (-1)^{n+1} \delta_4 \right] \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot m}{b} \cdot z \right). \quad (3)$$

Анализ численных результатов. В режиме резкого поверхностного эффекта обработке подлежит полая протяжённая алюминиевая трубчатая заготовка толщиной $0,001 \text{ м}$ с квадратной формой поперечного сечения: $0,02 \text{ м} \times 0,02 \text{ м}$, $a = b = 0,02 \text{ м}$.

Индукторы – одновитковые соленоиды прямоугольной формы выполнены из проводников с квадратным поперечным сечением: $0,002 \text{ м} \times 0,002 \text{ м}$, $d = 0,002 \text{ м}$. Изоляционные промежутки между витками и стенками заготовки $h = 0,001 \text{ м}$. Геометрически, расположение индукторов соответствует рис.1. Требуемые характеристики электромагнитных процессов в исследуемой индукторной системе вычисляются по формулам (2) и (3). Результаты вычислений представлены графическими зависимостями на рис.3.

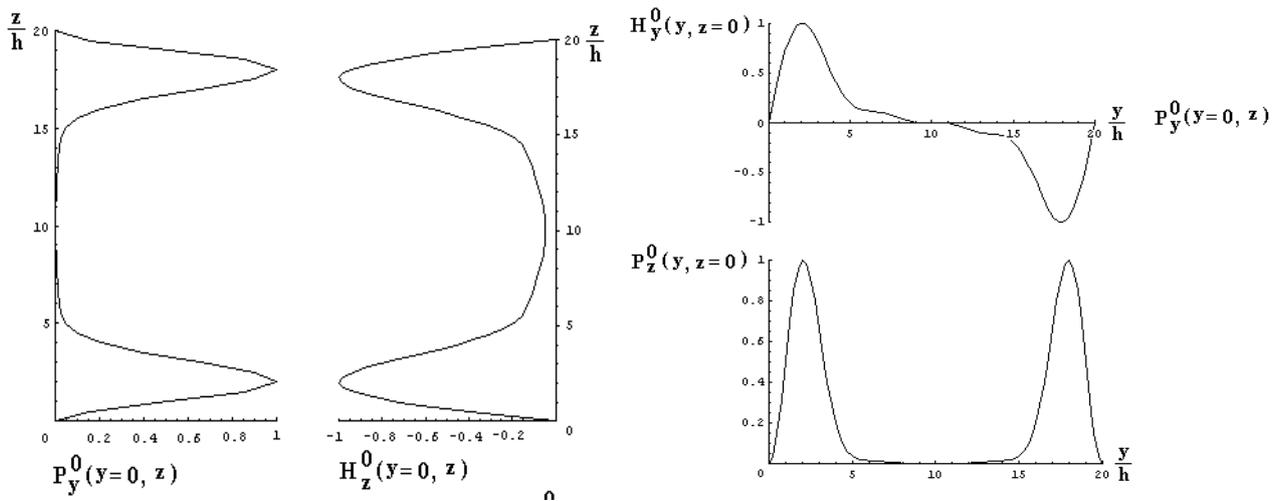


Рис. 3. Пространственные распределения касательных компонент напряжённости магнитного поля ($H_{y,z}^0$) и возбуждаемых сил давления ($P_{z,y}^0$) в относительных единицах.

Выводы. Проведенные расчеты показывают, что

- пространственные распределения полей и давлений таковы, что их максимумы сосредоточены вблизи внутренних углов обрабатываемой заготовки;
- концентрация возбуждаемых усилий в угловых зонах на двух взаимно ортогональных плоскостях означает появление равнодействующей силы давления с амплитудой $\sqrt{2} \cdot P_m$, направленной к центру угла;
- развитие процессов деформирования обрабатываемой заготовки должно происходить за счёт её растяжения по углам профиля поперечного сечения.

Литература: 1. Proceedings of the 1-st International Conference on High Speed Metal Forming. March 31/April 1. 2004. – Dortmund, Germany. 2. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. – Харьков: Вища школа. 1977. – 189 с. 3. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. – Л.: Энергия, 1982. – 188 с. 4. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. – Том 1. – Издание второе, переработанное и дополненное / Под общей ред. д.т.н., проф. Батыгина Ю.В. – Харьков: Изд."МОСТ-Торнадо", 2003. – 285 с.

УДК 519.85

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕДОВ С УЧЕТОМ ИХ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ПОВОРОТОВ

Чугай А.М., канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)

In the work for the purpose of construction of a mathematical model of an optimization problem of non-oriented parallelepipeds F-function for pair of non-oriented parallelepipeds is constructed. This F-function will allow applying gradient optimization methods for solving of an optimization problem of placing of non-oriented parallelepipeds.

В классе задач размещения 3D геометрических объектов [1] наименее изученными являются задачи, в которых допускаются аффинные преобразования не только трансляции, но и произвольного поворота объектов. Актуальность данной работы связана с тем, что для построения математических моделей оптимизационных задач размещения 3D геометрических объектов требуется аналитическое описание их взаимодействий. Целью данной работы является построение Ф-функции [2] для двух параллелепипедов с поворотами.

Постановка задачи. Пусть заданы параллелепипеды $P_i = \{(x, y, z) \in R^3 : -l_i \leq x \leq l_i, -w_i \leq y \leq w_i, -h_i \leq z \leq h_i\}$. Вершины P_i пронумеруем следующим образом: $p_{i1} = (l_i, w_i, h_i)$, $p_{i2} = (-l_i, w_i, h_i)$, $p_{i3} = (-l_i, -w_i, h_i)$, $p_{i4} = (l_i, -w_i, h_i)$, $p_{i5} = (l_i, w_i, -h_i)$, $p_{i6} = (-l_i, w_i, -h_i)$, $p_{i7} = (-l_i, -w_i, -h_i)$ и $p_{i8} = (l_i, -w_i, -h_i)$. P_i может быть транслирован на вектор $v_i = (x_i, y_i, z_i)$ и повернут на углы $\theta_i = (\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$, $i = 1, 2$, вокруг осей Ox , Oy и Oz соответственно. Вектор движения P_i обозначим $u_i = (v_i, \theta_i) \in R^6$. P_i , сдвинутый на вектор u_i , обозначим $P_i(u_i)$, $i = 1, 2$.

Матрица преобразования координат, выражающая координаты произвольной точки (x, y, z) в неподвижной системе координат через ее координаты (x', y', z') в повернутой на углы α_i , β_i и γ_i системе координат, имеет вид:

$$R_i = \begin{pmatrix} g_i \\ r_i \\ q_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{i1} & g_{i2} & g_{i3} \\ r_{i1} & r_{i2} & r_{i3} \\ q_{i1} & q_{i2} & q_{i3} \end{pmatrix}, \quad \text{где}$$

$$g_{i1} = \cos \beta_i \cos \gamma_i, g_{i2} = -\cos \beta_i \sin \gamma_i, g_{i3} = \sin \beta_i, r_{i1} = \sin \alpha_i \sin \beta_i \cos \gamma_i + \cos \alpha_i \sin \beta_i, \\ r_{i2} = -\sin \alpha_i \sin \beta_i \sin \gamma_i + \cos \alpha_i \cos \beta_i, r_{i3} = -\sin \alpha_i \cos \beta_i,$$

$$q_{i1} = -\cos \alpha_i \sin \beta_i \cos \gamma_i + \sin \alpha_i \sin \beta_i, q_{i2} = \cos \alpha_i \sin \beta_i \sin \gamma_i + \sin \alpha_i \sin \beta_i, \\ q_{i3} = \cos \alpha_i \cos \beta_i.$$

Тогда, матрица преобразования координат, выражающая координаты произвольной точки (x', y', z') в повернутой на углы α_i, β_i и γ_i системе координат через ее координаты (x, y, z) в неподвижной системе координат, имеет вид:

$$R'_i = \begin{pmatrix} g'_i \\ r'_i \\ q'_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g'_{i1} & g'_{i2} & g'_{i3} \\ r'_{i1} & r'_{i2} & r'_{i3} \\ q'_{i1} & q'_{i2} & q'_{i3} \end{pmatrix}, \quad \text{где}$$

$$g'_{i1} = \cos \beta_i \cos \gamma_i, g'_{i2} = \sin \gamma_i \cos \alpha_i + \cos \gamma_i \sin \beta_i \sin \alpha_i,$$

$$g'_{i3} = \sin \gamma_i \sin \alpha_i - \cos \gamma_i \sin \beta_i \cos \alpha_i,$$

$$r'_{i1} = -\sin \gamma_i \cos \beta_i, r'_{i2} = \cos \gamma_i \cos \alpha_i - \sin \gamma_i \sin \beta_i \sin \alpha_i,$$

$$r'_{i3} = \sin \alpha_i \cos \gamma_i + \sin \gamma_i \sin \beta_i \cos \alpha_i,$$

$$q'_{i1} = \sin \beta_i, q'_{i2} = -\cos \beta_i \sin \alpha_i, q'_{i3} = \cos \alpha_i \cos \beta_i.$$

Параллелепипед $P_i(u_i)$ определяется следующей системой неравенств

$$\begin{cases} F_{i1}(X, \theta_i) = g'_{i1}x + g'_{i2}y + g'_{i3}z - l_i \leq 0, \\ F_{i2}(X, \theta_i) = -g'_{i1}x - g'_{i2}y - g'_{i3}z - l_i \leq 0, \\ F_{i3}(X, \theta_i) = r'_{i1}x + r'_{i2}y + r'_{i3}z - w_i \leq 0, \\ F_{i4}(X, \theta_i) = -r'_{i1}x - r'_{i2}y - r'_{i3}z - w_i \leq 0, \\ F_{i5}(X, \theta_i) = q'_{i1}x + q'_{i2}y + q'_{i3}z - h_i \leq 0, \\ F_{i6}(X, \theta_i) = -q'_{i1}x - q'_{i2}y - q'_{i3}z - h_i \leq 0, \end{cases} \quad i=1,2. \quad (1)$$

Построение Φ -функции для $P_1(u_1)$ и $P_2(u_2)$. Для моделирования взаимодействия двух неориентированных параллелепипедов рассмотрим следующие 3 вида касаний, которые описывают все возможные виды касаний: 1) вершина $P_2(u_2)$ касается грани $P_1(u_1)$; 2) вершина $P_1(u_1)$ касается грани $P_2(u_2)$; 3) ребро $P_1(u_1)$ касается ребра $P_2(u_2)$.

Если $P_1(u_1)$ и $P_2(u_2)$ касаются, то существует по крайней мере одна пара точек $\gamma^*(\theta_1) \in frP_1(\theta_1)$ и $\gamma^{**}(\theta_2) \in frP_2(\theta_2)$, для которых

$$\gamma^*(\theta_1) = v_2 - v_1 + \gamma^{**}(\theta_2). \quad (2)$$

Рассмотрим первый вид касания. На основании (1) и (2) построим функцию

$$\Psi_1(u_1, u_2) = \max \left\{ \min \{ F_{1kj}(u_1, u_2), j \in J = \{1, 2, \dots, 8\} \}, k \in K = \{1, 2, \dots, 6\} \right\}, \quad \text{где} \quad (3)$$

$$F_{11j}(u_2) = g'_{i1}(g_2 p_{2j}^T + x_2 - x_1) + g'_{i2}(r_2 p_{2j}^T + y_2 - y_1) + g'_{i3}(q_2 p_{2j}^T + z_2 - z_1) - l_i = 0,$$

$$F_{12j}(u_2) = -g'_{i1}(g_2 p_{2j}^T + x_2 - x_1) - g'_{i2}(r_2 p_{2j}^T + y_2 - y_1) - g'_{i3}(q_2 p_{2j}^T + z_2 - z_1) - l_i = 0,$$

$$F_{13j}(u_2) = r'_{i1}(g_2 p_{2j}^T + x_2 - x_1) + r'_{i2}(r_2 p_{2j}^T + y_2 - y_1) + r'_{i3}(q_2 p_{2j}^T + z_2 - z_1) - w_i = 0,$$

$$F_{14j}(u_2) = -r'_{i1}(g_2 p_{2j}^T + x_2 - x_1) - r'_{i2}(r_2 p_{2j}^T + y_2 - y_1) - r'_{i3}(q_2 p_{2j}^T + z_2 - z_1) - w_i = 0,$$

$$\begin{aligned}
F_{15j}(u_2) &= q'_{11}(g_2 p_{2j}^T + x_2 - x_1) + q'_{12}(r_2 p_{2j}^T + y_2 - y_1) + q'_{13}(q_2 p_{2j}^T + z_2 - z_1) - h_i = 0, \\
F_{16j}(u_2) &= -q'_{11}(g_2 p_{2j}^T + x_2 - x_1) - q'_{12}(r_2 p_{2j}^T + y_2 - y_1) - q'_{13}(q_2 p_{2j}^T + z_2 - z_1) - h_i = 0, \\
i &= 1, 2.
\end{aligned}$$

Если $\Psi_1(u_1, u_2) \geq 0$, то $p_{2j}(u_2) \notin \text{int} P_1(u_1)$, $j \in J$, и $\text{int} P_1(u_1) \cap \text{int} P_2(u_2) = \emptyset$.

Рассмотрим второй вид касания. На основании (1) и (2) построим функцию

$$\Psi_2(u_1, u_2) = \max \left\{ \min \left\{ F_{2pj}(u_1, u_2), j \in J \right\}, p \in K \right\}, \text{ где} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
F_{21j}(u_1, u_2) &= g'_{21}(x_2 - x_1 - g_1 p_{1j}^T) + g'_{22}(y_2 - y_1 - r_1 p_{1j}^T) + g'_{23}(z_2 - z_1 - q_1 p_{1j}^T) - l_2 = 0, \\
F_{22j}(u_1, u_2) &= -g'_{21}(x_2 - x_1 - g_1 p_{1j}^T) - g'_{22}(y_2 - y_1 - r_1 p_{1j}^T) - g'_{23}(z_2 - z_1 - q_1 p_{1j}^T) - l_2 = 0, \\
F_{23j}(u_1, u_2) &= r'_{21}(x_2 - x_1 - g_1 p_{1j}^T) + r'_{22}(y_2 - y_1 - r_1 p_{1j}^T) + r'_{23}(z_2 - z_1 - q_1 p_{1j}^T) - w_2 = 0, \\
F_{24j}(u_1, u_2) &= -r'_{21}(x_2 - x_1 - g_1 p_{1j}^T) - r'_{22}(y_2 - y_1 - r_1 p_{1j}^T) - r'_{23}(z_2 - z_1 - q_1 p_{1j}^T) - w_2 = 0, \\
F_{25j}(u_1, u_2) &= q'_{31}(x_2 - x_1 - g_1 p_{1j}^T) + q'_{32}(y_2 - y_1 - r_1 p_{1j}^T) + q'_{33}(z_2 - z_1 - q_1 p_{1j}^T) - h_2 = 0, \\
F_{26j}(u_1, u_2) &= -q'_{31}(x_2 - x_1 - g_1 p_{1j}^T) - q'_{32}(y_2 - y_1 - r_1 p_{1j}^T) - q'_{33}(z_2 - z_1 - q_1 p_{1j}^T) - h_2 = 0, \\
j &\in J.
\end{aligned}$$

Если $\Psi_2(u_1, u_2) \geq 0$, то $p_{1j}(u_2) \notin \text{int} P_2(u_2)$, $j \in J$, и $\text{int} P_1(u_1) \cap \text{int} P_2(u_2) = \emptyset$.

Рассмотрим третий вид касания. Построим уравнение плоскости, которая проходит через ребро $e_{1j}(\theta_1) = [p_{1j_1}(\theta_1), p_{1j_2}(\theta_1)] \subset P_1(\theta_1)$ и точку $\tau_{jt}(\theta_1, \theta_2) = p_{1j_1}(\theta_1) - p_{2t_1}(\theta_2) + p_{2t_2}(\theta_2)$, в следующем виде:

$$\begin{aligned}
\Omega_{jt}(X, \theta_1, \theta_2) &= (x - g_1 p_{1j_1}^T) A_{jt}(\theta_1, \theta_2) + (y - r_1 p_{1j_1}^T) B_{jt}(\theta_1, \theta_2) + \\
&+ (z - q_1 p_{1j_1}^T) C_{jt}(\theta_1, \theta_2) = 0, j, t \in T = \{1, 2, \dots, 12\}.
\end{aligned} \quad (5)$$

На основании (2) и (5) построим уравнение

$$\begin{aligned}
X_{jt}(u_1, u_2) &= \Omega_{jt}(v_2 - v_1 + p_{2t_1}(\theta_2), \theta_1, \theta_2) = (x_2 + g_2 p_{2t_1}^T - x_1 - g_1 p_{1j_1}^T) A_{jt}(\theta_1, \theta_2) + \\
&+ (y_2 + r_2 p_{2t_1}^T - y_1 - r_1 p_{1j_1}^T) B_{jt}(\theta_1, \theta_2) + (z_2 + q_2 p_{2t_1}^T - z_1 - q_1 p_{1j_1}^T) C_{jt}(\theta_1, \theta_2), j, t \in T.
\end{aligned} \quad (6)$$

Основываясь на (6), построим функцию

$$\Psi_3(u_1, u_2) = \max \left\{ \min \left\{ F_{3jt}(u_1, u_2), j \in T \right\}, t \in T \right\} \quad (7)$$

$$F_{3jt}(u_1, u_2) = X_{jt}(u_1, u_2) \Gamma_{jt}(u_1, u_2), \text{ где}$$

$$\Gamma_{jt}(u_1, u_2) = \begin{cases} 1, \text{ если } \min \left\{ \Omega_{jt}(p_{1i}, \theta_1, \theta_2), -\Omega_{jt}(p_{2i}, \theta_1, \theta_2), i \in J \right\} \geq 0 \\ \text{или } \min \left\{ -\Omega_{jt}(p_{1i}, \theta_1, \theta_2), \Omega_{jt}(p_{2i}, \theta_1, \theta_2), i \in J \right\} \geq 0, \\ \emptyset, \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Если $\Psi_3(u_1, u_2) \geq 0$, то $\text{int} P_1(u_1) \cap \text{int} P_2(u_2) \neq \emptyset$.

Легко проверить, что описанные три вида касаний позволяют описать все возможные виды касаний двух неориентированных параллелепипедов.

На основании функций (3), (4) и (7) построим Φ -функцию для двух неориентированных параллелепипедов

$$\Phi(u_1, u_2) = \max \left\{ \Psi_i(u_1, u_2), i = 1, 2, 3 \right\} =$$

$$= \max \left\{ \max \left\{ \min \left\{ F_{1pj}(u_1, u_2), j \in J \right\}, p \in K \right\}, \max \left\{ \min \left\{ F_{2pj}(u_1, u_2), j \in J \right\}, p \in K \right\}, \right. \\ \left. \max \left\{ \min \left\{ F_{3tj}(u_1, u_2), j \in T \right\}, t \in T \right\} \right\}$$

Выводы. Научные и практические результаты данной работы заключаются в том, что построенная Ф-функция позволяет построить математическую модель оптимизационной задачи размещения неориентированных параллелепипедов и использовать для ее решения градиентные методы оптимизации, поскольку построенная Ф-функция позволяет задать область допустимых решений оптимизационной задачи в виде системы неравенств, левые части которых являются непрерывно-дифференцируемыми функциями.

Литература: 1. Стоян Ю.Г., Яковлев С.В. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования. – К.: Наук. думка, 1986. – 268 с. 2. Stoyan Yu. G. Ф-function and its basic properties // Докл. АН Украины. Сер. А. – 2001. – № 8. – С. 112-117.

УДК 621.825.8

СТРУКТУРА САПР ЦЕПНЫХ МУФТ

Сергеев С.А. (г. Курск, Россия)

In this paper, implemented the first stage of the CAD chain couplings.

В процессе проектирования цепных муфт, несмотря на многообразие его типов, приходится выполнять одни и те же операции [1]: выбор конструктивной схемы исходя из условий компоновки машинного агрегата; составление математической модели муфты и агрегата в целом; определение параметров деталей привода и выдача необходимой конструкторско-технологической документации (КТД). Между тем, качество получаемых при этом документов, сроки их выпуска и качество изделий, изготавливаемых по ним, не всегда удовлетворяют требованиям производства.

В целях обеспечения требуемого качества и своевременности выпуска конкурентоспособных типов цепных муфт сделана попытка создать элементы системы автоматизированного проектирования (САПР) цепных муфт [3, 4], позволяющей реализацию его синтеза на ЭВМ с обеспечением диалога пользователя с вычислительной машиной для достижения требуемых (оптимальных) результатов и выпуск необходимой КТД, причем выполнен переход от автоматизации выполнений отдельных инженерных расчетов к комплексной автоматизации процесса проектирования цепных муфт путем создания основ системы проектирования, базирующейся на регулярном применении современных математических методов и средств вычислительной техники в процессе принятия пробных решений, в организации и управлении проектированием.

В соответствии с характером производства цепных муфт, тенденциями его развития средств вычислительной техники предусматриваем две стадии создания и развития САПР «Цепных муфт», во-первых, автоматизация традиционной технологии процесса проектирования, которая охватывает отдельные процедуры проектирования (средний уровень автоматизации); во-вторых, комплексная автоматизация с учетом развития автоматизированного оборудования и технологии производства на базе гибких производственных систем (высокий

уровень автоматизации).

Весь процесс автоматизированного проектирования цепной муфты можно разделить на следующие основные этапы [2]: формирование технического задания; построение структурных схем; моделирование и синтез спроектированной структурной схемы муфты; проектирование принципиальной кинематической схемы; выбор и расчет параметров отдельных элементов и звеньев; проектирование муфты как системы; автоматизация вычерчивания; разработка технической документации на изготовление муфты; разработка эксплуатационной документации.

В настоящей работе реализуем первую стадию САПР цепных муфт в объеме указанных выше первых шести этапов. Вместе с тем, по мере накопления опыта и развития программных средств и средств вычислительной техники будет создаваться реальная база разработки программно-методических и программно-технических комплексов высокоавтоматизированного проектирования.

Для САПР «Цепных муфт» разрабатываем базовые программно-методические комплексы (ПМК) с вводом в действие следующих подсистем: проектирования по типам цепных муфт; текстового и графического документирования; инструмента; проектирования технологических процессов.

Создание автоматизированного банка данных для цепных муфт представляем в две стадии в соответствии со стадиями создания и развития САПР «Цепных муфт», т.е. сначала для среднего уровня автоматизации проектирования, а затем для комплексной автоматизации на уровне подотраслевого назначения. Все компоненты ПМК разрабатываемой САПР ориентированы на применение ЭВМ типа IBM PC-совместимая ЭВМ в операционной системе Windows XP и используемый алгоритмический язык – Borland Delphi 7.

Автоматизацию процесса проектирования цепных муфт предусматриваем для выполнения четырех основных задач:

- 1) выбора математической модели цепных муфт с учетом технико-экономических требований к ним (надежность, технологичность, стоимость, эргономичность и т.п.);
- 2) выбора типоразмера муфты, используя банк накопленной информации;
- 3) организации вычислительного процесса на ЭВМ, исключая процедуру оптимизации, реализующего выполнение указанных требований к муфте;
- 4) выпуска необходимого для изготовления муфты комплекта КТД.

Организация связей внутри ПС предусматривает как совершенствование отдельных модулей, так и развитие всей ПС за счет включения в нее новых модулей. Каждая подсистема может использоваться автономно. Возможны пакетный и диалоговый режимы работы. Описание САПР цепных муфт приведено в работах [1, 2, 5 и др.].

САПР цепных муфт создается в две стадии. На первой стадии осуществляется автоматизация традиционной технологии проектирования (средний уровень автоматизации), а на второй – комплексная автоматизация с учетом развития автоматизированного оборудования и технологии производства на базе гибких производственных систем (высокий уровень автоматизации).

Разрабатываемая на первой стадии САПР цепных муфт соответствует сред-

нему уровню автоматизации. Эта система универсальна: она позволяет выполнять оптимальный синтез цепных муфт с использованием банка, накопленных проектных решений в типовых ситуациях и при отсутствии готовых решений.

Литература: 1. Сергеев С.А. Повышение эффективности автоматизированного проектирования цепных муфт на основе создания их математической модели. – Дис. ... канд. техн. наук. Сергеев Сергей Александрович. – М.: МГТУ «Станкин», 2007. – 215 с. 2. Тарабасов Н.Д. Цепные муфты. Проектирование, изготовление и эксплуатация: Справочник / Н.Д. Тарабасов, П.Н. Учаев. – М.: Машиностроение, 1987. – 256 с. 3. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2006613694 Российская Федерация. Система автоматизированных инженерных расчетов цепных муфт / Учаев П.Н., Емельянов С.Г., Сергеев С.А.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Курский гос. технич. университет. Зарегистрир. в Реестре прогр. для ЭВМ 24.10.2006. 4. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007612399 Российская Федерация. Автоматизированный контроль степени изнашивания зубьев звездочек / Учаев П.Н., Емельянов С.Г., Сергеев С.А.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Курский гос. технич. университет. Зарегистрир. в Реестре прогр. для ЭВМ 07.06.2007. 5. Сергеев С.А. Система автоматизированного проектирования и конструирования цепных муфт // Известия Тульского государственного университета. – Тула: ТулГУ, 2008. – С. 37-42.

УДК 681.3

ПРИМЕНЕНИЕ АКСЕЛЛЕРАЦИОННЫХ ФОРМ ПРОДУКЦИИ ДЛЯ КОМПИЛЯЦИИ ПРОГРАММ

Зерин И.С., аспирант, Авдеев А.В., аспирант, Довгаль В.М., докт. техн. наук, Гордиенко В.В., канд. техн. наук, Малыхин В.В., канд. техн. наук
(г. Курск, Россия)

This article is devoted to problem of Markov's production acceleration, which are the basement of program compilation.

Проблема акселерации компиляции программ становится все актуальнее по мере увеличения размера создаваемых программ. Когда объем исходных текстов программ на языках высокого уровня достигает размеров в несколько десятков или сотен мегабайт, время компиляции программы занимает существенную долю от всего времени затраченного на разработку программного продукта, что влечет за собой дополнительные затраты.

По сути, процесс компиляции представляет собой анализ текстовых файлов (исходных кодов) с их последующим преобразованием.

Процесс компиляции состоит из следующих этапов[3]:

1. Лексический анализ. На этом этапе последовательность символов исходного файла преобразуется в последовательность лексем.
2. Синтаксический (грамматический) анализ. Последовательность лексем преобразуется в дерево разбора.
3. Семантический анализ. Дерево разбора обрабатывается с целью установления его семантики (смысла) — например, привязка идентификаторов к их декларациям, типам, проверка совместимости, определение типов выражений и т. д. Результат обычно называется «промежуточным представлением/кодом», и может быть дополненным деревом разбора, новым деревом, абстрактным набором команд или чем-то ещё, удобным для дальнейшей обработки.
4. Оптимизация. Выполняется удаление излишних конструкций и упрощение

кода с сохранением его смысла. Оптимизация может быть на разных уровнях и этапах — например, над промежуточным кодом или над конечным машинным кодом.

5. Генерация кода. Из промежуточного представления порождается код на целевом языке.

На всех этапах компиляции явно прослеживается продукционная логика работы. Например, лексический анализ представляет собой процесс замены символов и операторов языка программирования на лексемы, то есть операция поиска и замены подстроки в строке. Семантический анализ уже представляет собой работу с системой продукций и является разновидностью логического вывода.

Современные компиляторы логически действуют именно так, но для их функционирования приходится реализовывать продукционную схему работы на ЭВМ, предназначенных для числовых вычислений. Соответственно, такая «эмуляция» продукционной схемы приводит к значительным потерям в скорости. Многочисленные оптимизации процесса компиляции позволяют немного улучшить скоростные показатели на отдельных этапах или определенных наборах входных данных, но коренным образом не меняют ситуацию.

Отдельно стоит отметить современную тенденцию к созданию кроссплатформенных приложений. В этом случае переводят программу не в машинный код, а в программу на некотором специально созданном низкоуровневом языке. Программа на байт-коде подлежит интерпретации виртуальной машиной, либо ещё одной компиляции уже в машинный код непосредственно перед исполнением.

Эта ветвь программного обеспечения имеет большие перспективы, но проигрывает в скоростных показателях традиционному подходу создания программного обеспечения под конкретную платформу. Это объясняется необходимостью вторичной «компиляции» программы виртуальной машиной в режиме реального времени. А данная операция представляет собой автоматическую трансляцию байт-кода программы в код целевой машины. Использование аппаратной поддержки операций символьной обработки позволило бы не только повысить скорость компиляции программ, но и поднять на новый уровень производительность кроссплатформенных приложений.

Все приведенные выше процессы построены на понятии продукции. Рассмотрим возможность акселерации продукции.

Марковской продукцией называется слово вида [1]:

$$E \rightarrow C, \tag{1}$$

где \rightarrow – разделитель слов E и C ; E и C – любые слова, возможно в расширении заданного алфавита A .

Между тем, в универсальной системе Маркова и его элементарной операции присущи существенные метрические недостатки, которые связаны с высоким уровнем временной (вычислительной) сложности.

Основная проблема заключается в том, что при работе текущей продукции при длинных обрабатываемых словах (порядка десятков и сотен мегабайт) и обнаруженной позиции вхождения образца, например, в конце слова, после выполнения отступа на первую букву обрабатываемого слова будет выполняться многошаговый, и «холостой» просмотр для обнаружения очередной позиции

вхождения образца.

Все продукции можно разделить на две группы: самоопределяющиеся, то есть продукции, которые потенциально могут создать вхождение образца в уже просмотренной части слова и несамоопределяющиеся.

Для четкого разделения продукции на классы используется конструктивная дизъюнкция [2]:

$$(E_o = C_n)V(E_n = C_o)V(E_o = C)V(E_n = C)V(E = BCD), \quad (2)$$

где индексы "н" и "о" обозначают собственные начала и окончания слов соответственно; B,D - любые слова в заданном фиксированном алфавите.

Высказывание (2) является строгим индикатором распознавания классов продукции, поскольку своим ложным значением оно однозначно определяет не самоопределяющиеся продукции, а истинным значением – самоопределяющиеся. В случае работы с несамоопределяющейся продукцией можно использовать безотступную технологию поиска и замены образцов в слове.

Для преобразования самоопределяющихся продукции введена [2] унифицированная операция итерации, которую используется для записи акселерационных форм представления продукции этого класса с целью обеспечения возможности выполнять безотступную технологию сопоставления. С этой целью модифицирован синтаксис записи самоопределяющихся продукции и используются скобки итераций. В результате получим три формы представления продукции:

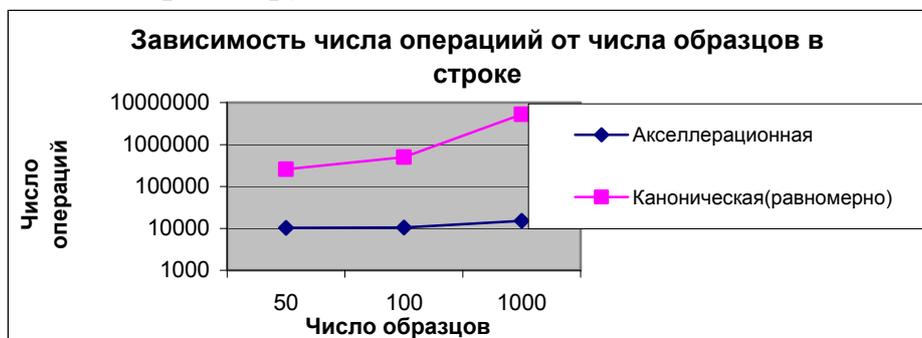
$$!\{E_n\}_k E_o \rightarrow C_n \{C_o\}_k!, \quad (3)$$

$$!E_n \{E_o\}_k \rightarrow \{C_n\}_k C_o!, \quad (4)$$

$$!\{E_n\}_i C \{E_o\}_j \rightarrow C!, \quad (5)$$

где индексы-счетчики i и j являются указателями числа вхождения фрагментов соответствующих фрагментов E_n и E_o , индекс-счетчик k указывает на число смежных повторений фрагментов в образце и модификаторе.

Для всех акселерационных форм представления продукции (3) – (5) вводится маркер-указатель (!), который позволяет определить позицию начала очередного сопоставления в обрабатываемом слове является основным инструментом акселерации работы продукции. Расстановка маркеров-указателей осуществляется использования левой конкатенации маркера к образцу и правой конкатенации к модификатору.



Центральная акселерационная форма продукции (5) является обобщенной формой двух предыдущих форм (3-4), поэтому дальнейшее исследование проводится с использованием этой акселерационной формы. Временные затраты на обработку символьной строки длиной 10000 символов акселерационной и

канонической формами продукции приведены на графике.

Временные затраты на процедуру поиска остаются линейно изменяющейся величиной от числа вхождений образцов в обрабатываемом слове. Выполнение операции поиска и замены классическим способом приводит к квадратичной зависимости. Поэтому разработанные средства акселерации целесообразно использовать в компиляторах.

Литература: 1. Теория алгоритмов / А.А. Марков, Н.М. Нагорный. – М.: ФизМат, 1981. – 432 с. 2. Методы модификации формальных систем обработки символьной информации / В.М. Довгаль. – Курск: Курск. гос. техн. ун.-т., 1996. – 115 с. 3. Альфред В. Ахо, Моника С. Лам, Рави Сети, Джеффри Д. Ульман. Компиляторы: принципы, технологии и инструментарий. – 2 издание. – Compilers: Principles, Techniques, and Tools. – 2 изд. – М.: «Вильямс», 2008.

УДК 621.3

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБРАЗЦА В ПРОДУКЦИИ ДЛЯ ПОИСКОВЫХ СИСТЕМ

Ткаченко А.С., аспирант, **Тарасов А.А.**, аспирант, **Малыхин В.В.**, канд. техн. наук, **Довгаль В.М.**, докт. техн. наук, **Гордиенко В.В.**, канд. техн. наук
(г. Курск, Россия)

Improved algorithm of pattern retrieval in source for search engines.

Комплекс программ, обеспечивающий функциональность поисковой системы, называют поисковый движок или поисковая машина. Основными критериями качества работы поисковой машины являются скорость поиска (скорость отсеивания ненужной информации), релевантность (степень соответствия запроса и найденного, то есть уместность результата), полнота базы, учёт морфологии языка. По сути все сводится к поиску подстроки в строке символов.

Поиск может быть существенно затруднен наличием повторяющихся участков в символьной строке, что приводит к трате времени поискового алгоритма на обработку сегмента символьной строки, внешне напоминающего искомое слово, но порой отличающегося лишь последним символом. Проблема не кажется существенной при простом повторении символов в строке. Немного сложнее, когда повторяются уже группы символов. В реальной же ситуации поисковый алгоритм проходит множество итераций в цикле поиска образца в строке, когда целые слова повторяются в повторяющихся группах символов.

Цель данной публикации создания программно-алгоритмических средств для быстрого поиска подстроки в строке символов. При этом разработанное алгоритмическое средство не должно уступать по скорости существующим на сегодняшний день аналогам в предметной области. Существующее разнообразие алгоритмов символьного поиска не отвечают требованиям в скорости работы или затратах памяти.

Для поиска образца в строке символов в разработанном программно-алгоритмическом средстве используется модифицированный алгоритм, основанный на алгоритме Кнута-Морриса-Пратта (КМП-алгоритм). КМП-алгоритм появился в результате анализа алгоритма грубой силы. Исследователей привле-

кали способы использования информации, полученной во время сканирования строки (алгоритм грубой силы ее не анализирует) [1]. Отличие разработанного алгоритма от КМП заключается в ускоренном поиске с большим количеством повторяющихся фрагментов в строках и в образцах.

Перед непосредственным поиском позиции образца он анализируется алгоритмом на наличие повторяющихся участков. Алгоритм также учитывает вложенность повторяющихся последовательностей. Как правило, чем глубже вложенность в структуре образца, тем больше времени затратит КМП-алгоритм на сопоставление образца со строкой. Разработанный алгоритм при обнаружении большего количества повторений в строке, чем в образце, учитывает все вхождения повторяющихся слов по всей структуре вложений. Левая граница вхождения образца вычисляется с помощью возврата указателя на количество позиций равное произведению числа вхождений повторяющегося слова в образец на длину этого слова. Установлено, что это справедливо для любого уровня вложенности слов.

Для разработанного нами алгоритма целесообразно рассмотреть его применение на конкретных специально подобранных входных данных, отвечающим назначению алгоритма по сложности и структуре. В качестве образца будет выступать следующая последовательность символов: $\| \| a|_4 b|_3 cd|_2 f$, где $|x|_n$ - повторение x в этой последовательности n раз.

Предлагаемая форма представления образца подобрана так, чтобы с иллюстративной целью повысить уровень сложности процесса поиска в ней позиции заданного образца. Пусть фрагмент обрабатываемого слова имеет вид:

aaaaaabaaba abaaaaba abcdaaaaba aaabaaaabc daaaabaaba baaaabcdf .

Заданный фрагмент можно представить в компактном виде по аналогии с образцом, что приводит к следующей форме представления в следующем виде:

$$\| \| a|_6 b|_1 \| \| a|_4 b|_3 cd|_3 f$$

Как видно в продукции содержатся слова, например, $|a|_6$ и $\| \| a|_6 b|_1$, усложняющие поиск и побуждающие КМП-алгоритм делать лишние итерации. В отличие от КМП-алгоритма разработанный алгоритм определяет все вхождения повторяющихся слов, при этом не отступая, и применительно к этой продукции сначала отбросит слово $|a|_2$, оставив лишь $|a|_4$, затем слово $\| \| a|_6 b|_1$ и, наконец, первую итерацию слова $\| \| a|_4 b|_3 cd|_1$. Это существенно сокращает время поиска образца, особенно в случае сложных входных данных.

Алгоритм может найти свое применение в любых поисковых системах, где осуществляется текстовый поиск. Скоростные преимущества алгоритма будут особенно проявлять на словах в алфавитах с малой мощностью, например, на бинарных данных.

Разработан программный продукт, реализующий алгоритм, представляет собой программную реализацию ассоциативного исчисления, структура и по-

исковые особенности которого позволяют осуществлять поиск по образцу в тексте с меньшими временными затратами по отношению к КМП-алгоритму по всем бейнчмаркам. На ряде входных данных скоростное преимущество над КМП-алгоритмом составляет один порядок и более. По остальным характеристикам, таким как релевантность, полнота базы и учёт морфологии языка, у алгоритмов отличий нет. А так как среди поисковых алгоритмов одним из самых быстрых является КМП-алгоритм, то разработанное программное средство можно считать реализацией вполне достойной альтернативы существующим алгоритмам поиска.

Литература: 1. Donald Knuth; James H. Morris, Jr, Vaughan Pratt (1977). "Fast pattern matching in strings". SIAM Journal on Computing 6 (2): 323–350. DOI:10.1137/0206024

УДК 621.3

БЛОЧНОЕ ШИФРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ СЕТИ ФЕЙСТЕЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ХАОТИЧЕСКИХ ОТОБРАЖЕНИЙ

Тарасов А.А., аспирант, **Спирин С.Г.**, аспирант, **Гордиенко В.В.**, канд. техн. наук, **Новиков С.Г.**, канд. техн. наук, **Довгаль В.М.**, докт. техн. наук
(г. Курск, Россия)

The fundamental relationship between the properties of chaotic and cryptographic systems is considered at the theoretical and practical layers In this review, we introduce the application for protection of ED from the non-authorized access based on Feistel network with chaotic key generator.

В настоящее время информация становится одним из наиболее важных и ценных продуктов, созданных человеком. Именно поэтому большое значение придается ее защите от неправомерного получения и использования. Под обеспечением конфиденциальности информации понимается решение проблемы защиты информации от ознакомления с ее содержанием лиц, не имеющих права доступа к ней, а также исключение возможности несанкционированного изменения информации.

Частично ряд из отмеченных задач по защите информации решается на основе принятия соответствующих нормативно-правовых актов, использования организационных и режимных мер. Вместе с тем большую роль в защите информации играет криптография.

В данной работе рассматривается применение теории хаоса в области кодирования и передачи информации.

Под методом кодирования и передачи информации понимается алгоритм криптографии, соответствующий следующим требованиям: обеспечение конфиденциальности информации, обеспечение целостности информации.

Сущность предлагаемого способа криптографического преобразования представляет собой симметричный блочный шифр, основанный на алгоритме сети Фейстеля, который представляет собой итерированную структуру, называемую ячейкой Фейстеля. Шифрование при помощи данной конструкции легко реализуется как на программном уровне, так и на аппаратном, что обес-

печивает широкие возможности применения.

Рассмотрим процесс шифрования информации представленной в двоичном виде в компьютерной памяти (например, файл), как последовательность байт. Вся информация разбивается на блоки фиксированной длины. В случае, если длина входного блока меньше, чем размер, который шифруется заданным алгоритмом, то блок искусственно удлиняется.

Длина блока равна 128 бит. Далее будем рассматривать операции происходящие только с одним блоком, так как с другими в процессе шифрования выполняются те же самые операции, но с разными раундовыми ключами.

Выбранный блок делится на два равных подблока – «левый» (L0) и «правый» (R0). «Левый подблок» L0 видоизменяется функцией $f(L0, K0)$ в зависимости от раундового ключа K0, после чего он складывается по модулю 2 с «правым подблоком» R0

$$f(L0, K0) = L0 \text{ xor } K0. \quad (1)$$

Результат сложения присваивается новому левому подблоку L1, который будет половиной входных данных для следующего раунда, а «левый подблок» L0 присваивается без изменений новому правому подблоку R1, который будет другой половиной. После чего операция повторяется N-1 раз, при этом при переходе от одного этапа к другому меняются раундовые ключи (K0 на K1 и т. д.), где N — количество раундов в заданном алгоритме.

Раундовый ключ K_i получается в результате генерации хаотической числовой последовательность генератором TentMap. Стартовое значение генератора, количество и интервал смещения траектории, а также величина приращений, являются ключевой информацией введённой пользователем.

Аналитическое представление генератора TentMap: μ - константа из диапазона (0..1):

$$x_{n+1} = \begin{cases} \mu x_n & \text{for } x_n < \frac{1}{2} \\ \mu(1 - x_n) & \text{for } \frac{1}{2} \leq x_n \end{cases}$$

Для повышения устойчивости шифрования к информационным атакам все последующие раундовые ключи для шифрования остальных блоков исходного файла получают путём генерации хаотического ряда, в качестве стартового значения которого, берётся последнее значение ряда на предыдущем шаге шифрования. Рассмотрим процесс расшифрования информации представленной в двоичном виде в компьютерной памяти (например, файл), как последовательность байт.

Расшифровка информации происходит так же, как и шифрование, с тем лишь исключением, что ключи идут в обратном порядке, то есть не от первого к N-ному, а от N-го к первому.

Ключевая последовательность, полученная при помощи дискретного хаотического отображения, имеет свойство сплошного спектра и нестационарности, что исключает возможность применения спектрального анализа и методов теории вероятности для взлома зашифрованного сообщения.

Для увеличения устойчивости к информационным атакам целесообразно использовать несколько раундов шифрования каждого информационного блока.

В соответствии с предлагаемым алгоритмом был разработан программный продукт для криптографической защиты информации.

Программный продукт написан на языке высокого уровня C# с использованием библиотеки dotNET Framework 2.0

Выбор языка обусловлен тем, что при реализации алгоритма возникает необходимость обращения к битам входящим в состав байтовых массивов. Библиотека dotNET Framework имеет набор необходимых классов и методов для безопасной обработки битовых строк.

УДК 681.3

АЛГОРИТМ СЖАТИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПО ЗАДАННОМУ ФРАГМЕНТУ

Гордиенко В.В., канд. техн. наук, Гора С.Ю., Галахов Д.И.,
Довгаль В.М., докт. техн. наук, Спирин С.Г., аспирант
(Курск, Россия)

Abstract: the algorithm of generation chaotic sequences of Hinon, usage of it for compressing, the method, which allows compressing the picture by deleting a part of it with the next reassembling, are described.

В течение последних 10 лет в рамках компьютерной графики бурно развивается совершенно новая область – алгоритмы сжатия изображений. Появление этой области обусловлено тем, что изображения – это своеобразный тип данных. Изображения (как и видео) занимают намного больше места в памяти, чем текст. Так не очень качественная иллюстрация на обложке книги размером 500x800 точек, занимает 1.2 Мб – столько же, сколько художественная книга из 400 страниц (60 знаков в строке, 42 строки на странице). В качестве примера можно рассмотреть также, сколько тысяч страниц текста можно поместить на CD-ROM, и как мало там поместится качественных несжатых фотографий. Эта особенность изображений определяет актуальность алгоритмов сжатия графики.

Второй особенностью изображений является то, что человеческое зрение при анализе изображения оперирует контурами, общим переходом цветов и сравнительно нечувствительно к малым изменениям в изображении. Таким образом, можно создать эффективные алгоритмы сжатия изображений, в которых декомпрессированное изображение не будет совпадать с оригиналом, однако человек этого не заметит. Значит, при создании алгоритма компрессии графики используются особенности структуры изображения.

В данном алгоритме, для генерации хаотических последовательностей, используется ряд Хинона. Функция, реализующая генератор, имеет следующий вид:

$$F = \begin{cases} x = 1 - 1/4 * x_0 + y_0; \\ y = 0/3 * x_0. \end{cases}$$

График ее работы показан на рис. 1.

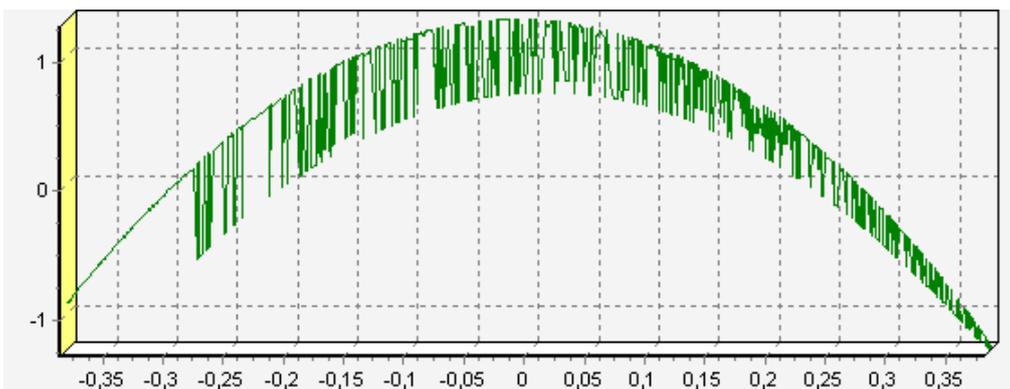


Рис.1. Вид последовательности значений хаотического ряда Хинона.

Метод в вербальной форме представлен следующим алгоритмом:

1. Черно-белое изображение представляется в виде единиц и нулей.
2. Генерируется хаотический ряд.
3. Каждому пикселю изображения ставится в соответствие число ряда.
4. Хаотический ряд упорядочивается, соответственно и перемешиваются пиксели изображения (рис. 2).

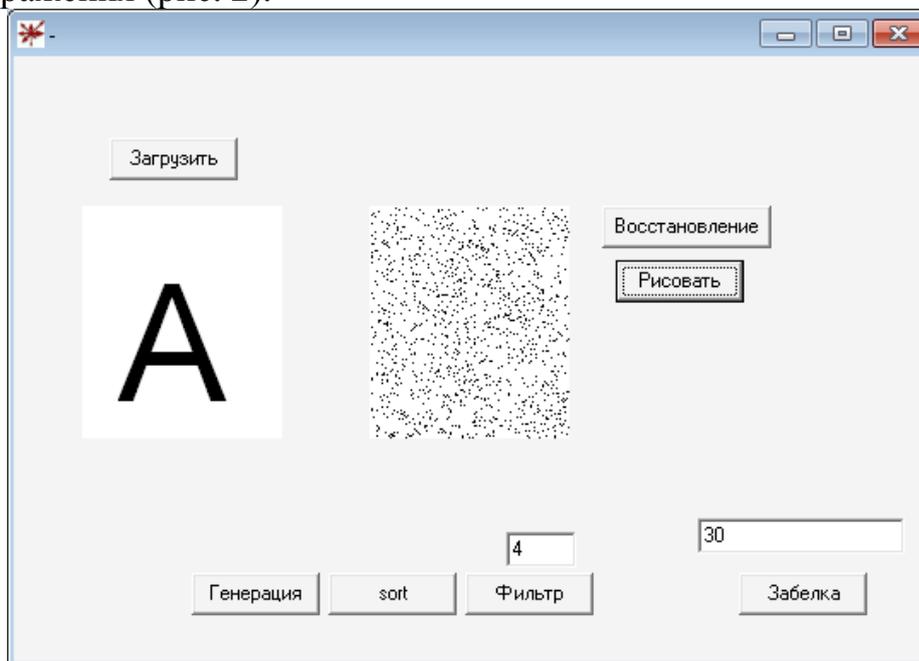


Рис. 2. Исходное изображение и после упорядочения хаотического ряда.

5. Часть изображения удаляется (рис. 3) Полученное изображения может быть записано в файл в виде единиц и нулей, что позволяет существенно снизить его размер, и передано по каналу связи.
6. Пользователь, получивший изображение, может восстановить его, приведя хаотический ряд к исходному виду (рис. 4).
7. Для улучшения качества изображения может быть применен специальный фильтр. Суть его состоит в следующем: В нуль-единичной последовательности рассматривается каждый нулевой пиксель изображения и все соседние с ним, если среди соседних пикселей преобладают единицы, то и исследуемый пиксель инвертируется, вследствие чего, восстанавливается дефицит единиц (рис. 5).

Программный продукт реализован в среде Borland Delphi 6, эксперименты показали, что изображение может быть восстановлено без существенной потери качества при уничтожении до 70% поверхности картинка. Так же, программный продукт позволяет, во много раз сжимать изображение, для примера, изображение размером в 47 кб может быть сжато до 9 кб. Таким образом, изображение сжимается более чем в пять раз, при несущественной потере качества.

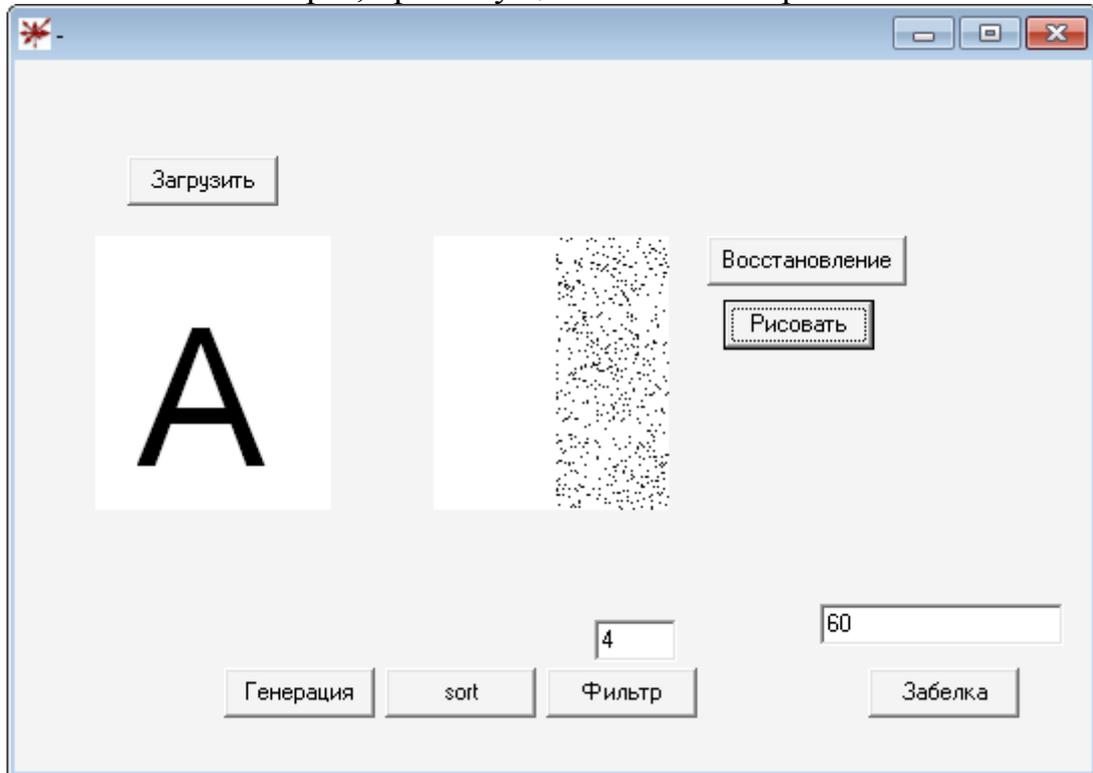


Рис. 3. Удаление половины изображения.

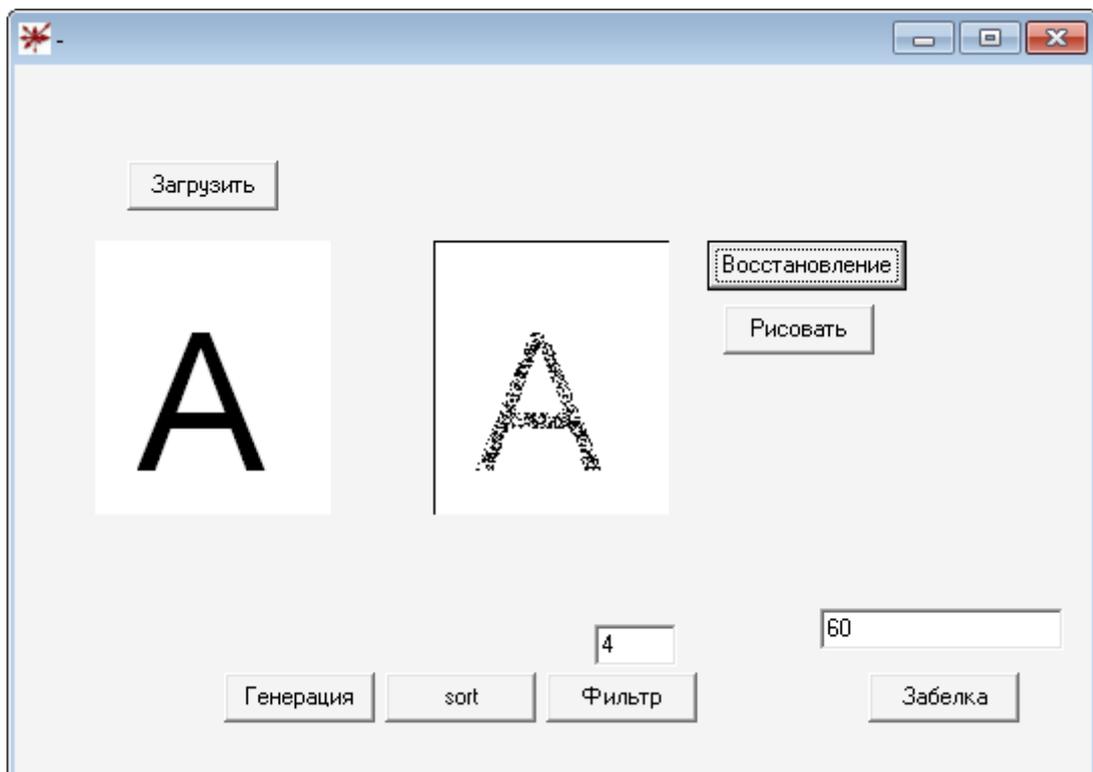


Рис. 4. Восстановленное изображение.

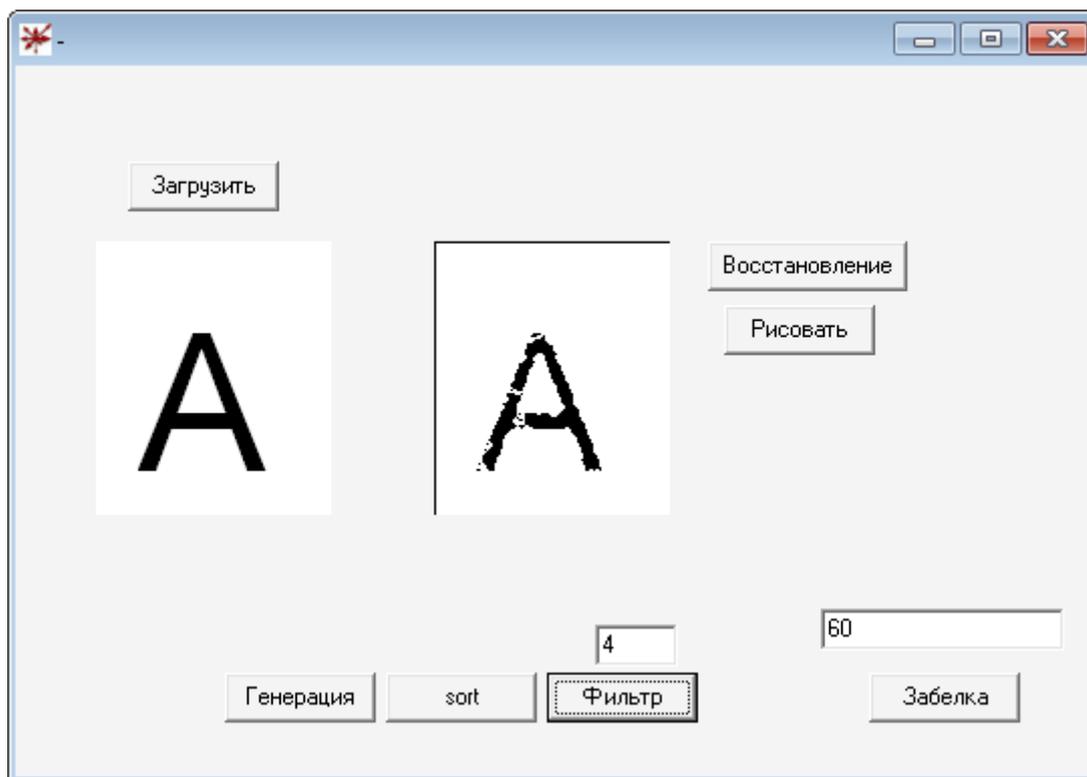


Рис. 5. Применение фильтра.

УДК 681.3

ПРИМЕНЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ В РАСПОЗНАВАНИИ ОБРАЗОВ

Авдеев А.В., аспирант, Зерин И.С., аспирант, Довгаль В.М., докт. техн. наук,
Гордиенко В.В., канд. техн. наук, Малыхин В.В., канд. техн. наук
(г. Курск, Россия)

Application for mechanisms of chaotic dynamics in recognition of images.

Распознавание образов – это отнесение исходных данных к определенному классу с помощью выделения существенных признаков, характеризующих эти данные из общей массы несущественных данных.

Не снижающийся интерес к задачам распознавания обусловлен необходимостью автоматизации как функций контроля и управления сложными динамическими объектами в реальном времени, так и образных процессов коммуникации (визуальных, речевых) в интеллектуальных системах. Поэтому до сих пор продолжается поиск и реализация эффективных принципов передачи распознавательной функции человека компьютеризированным системам.

Все большее распространение получают системы автоматизированного ввода информации через различные типы сканеров (ручные, листовые, барабанные, графические планшеты, дигитайзеры, факс-модемы), а также цифровые фото- и видеокамеры. При этом по разрешающей способности такие системы ввода вполне приближаются к зрению человека или животных, а с учетом быстродействия ближайшей технической моделью глаза следует признать видео- и цифровые фотокамеры. Так ПЗС матрица цифровой фотокамеры давно обеспечивает разрешение до 3 млн. пикселей на кадр, а современным высокопроизводитель-

ным компьютерам вполне доступна несложная обработка в реальном масштабе времени, например, пространственная плоско - параллельная корреляция.

Необходимость углубленной обработки и распознавания изображений могут эффективно применяться в робототехнике и экспертных системах. Промышленные роботы, снабженные компьютерным зрением позволяют сравнительно быстро и дешево производить переналадку производства на выпуск новой продукции, а транспортные роботы благодаря зрению обеспечивают надежную ориентацию в пространстве. Экспертные системы, опирающиеся на базы данных, включающие изображения, для поиска и распознавания заданных объектов требуют быстрого и надежного анализа оцифрованной видеoinформации в специализированных архивах изображений либо в базах Интернет.

Одно из перспективных направлений решения данной проблемы основано на применении механизмов хаотической динамики в распознавании образов.

Анализ экспериментальных данных и теоретических представлений об информационных процессах в живых системах позволяет выдвинуть и в значительной степени обосновать гипотезу о существовании общих принципов и закономерностей обработки информации в системах со сложной динамикой, не зависящих от конкретного вида и реализации самих систем. Роль хаоса в обработке информации мозгом человека и животных как научная проблема приобретает всё большее значение.

В настоящее время разрабатываются и применяются различные методы применения хаотических систем с целью распознавания: основанные на использовании хаотических процессоров, на методах записи многомерных сигналов на отображениях, обладающих возможностями быстрого ассоциативного поиска и многие другие.

В результате обзора и анализа предлагаемых методов применения данных механизмов в рассматриваемой предметной области был сделан вывод о необходимости поиска новых приложений хаотической динамики к решению проблем распознавания.

На настоящее время существует острая необходимость в акселерации процесса распознавания образов по временной составляющей. С этой целью нами осуществляется разработка принципиально нового метода распознавания, основанного на применении определённых свойств двумерных хаотических отображений.

Любой процесс распознавания состоит из двух этапов – предварительной обработки и сопоставления с образцами с целью классификации. Обе эти составляющие имеют собственный вес в определении суммарной временной и ёмкостной сложности распознавания. Предлагаемый метод обработки изображений для их распознавания отличается от существующих классических тем, что не базируется на структурно-дифференциальном контурном подходе. В данный момент существует тенденция к использованию нейронных сетей для распознавания зашумлённых искажённых графических образов. Предлагаемый метод позволит с определённой мерой эффективности получать неискажённые графические образы, не прибегая к моделированию сложных нейронных систем и их сложному многоступенчатому обучению.

Предлагаемый метод базируется на возможности восстановления изображения по его особому представлению, образованному при равномерном хаотическом распределении отдельных элементов данного изображения в двумерном пространстве. Образец подвергается тому же преобразованию, что и эталонное изображение, хранящееся в модифицированном виде в базе. Уже на этапе преобразования существует возможность параллельного сравнения образца и эталона. Таким образом, наихудший – наиболее затратный по времени – случай при таком подходе заключается в подаче для распознавания нового, отсутствующего в базе изображения.

Алгоритм метода не базируется на топологии образца, а формирует собственный уникальный хаотический портрет эталонного изображения. Такой подход в перспективе позволит применять метод не только с целью распознавания печатных символов, но и произвольных графических объектов.

В процессе сопоставления обработка представленного к распознаванию изображения ведётся динамически и не требует полной загрузки образца в оперативную память ЭВМ. Это позволяет получить эффект существенной экономии времени, затрачиваемого на обработку, не ухудшая при этом ёмкостную характеристику.

Таким образом, разрабатываемый метод распознавания должен найти применение в широком спектре систем данной предметной области и имеет достаточный потенциал акселерации процесса распознавания как по временной, так и по ёмкостной характеристикам сложности.

Литература: 1. Андреев Ю.В. Хаотические процессоры // А.С. Дмитриев, Д.А. Куминов, пер. Зарубежная электроника. Успехи современной радиоэлектроники № 10, ИАПУ ДВО РАН. – М., 1997. 2. Анисимов Б.В. // Распознавание и цифровая обработка изображений // Б.В. Анисимов, В.Д. Курганов, В.К. Злобин. – М.: Высшая школа, 1983.

УДК 004.056.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФУНКЦИЙ ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЦЕЛОСТНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ ДОКУМЕНТОВ

Кошута А.А., аспирант, **Залозных И.И.**, аспирант,

Довгаль В.М., докт. техн. наук, **Гордиенко В.В.**, канд. техн. наук,

Малыхин В.В., канд. техн. наук (г. Курск, Россия)

The fundamental relationship between the properties of chaos functions and electronic documents protection is considered at the theoretical and practical layers. In this review, we introduce the application for protection of ED from the non-authorized access through implementing the algorithm with the key feature of the chaos function.

В постиндустриальную эпоху интенсивность обмена информацией возрастает лавинообразно. По данным статистических агентств сейчас во всем мире в день по каналам связи пересылается более миллиарда документов. Среди этого количества растет доля информации, которой требуется защита от информационных атак. По прогнозам к 2010 году ее доля составит 60%.

Многие компании передают по компьютерным сетям только зашифрованную информацию и даже защищают каждый отдельный документ в своих офисах.

Подлинность документа удостоверяется подписью. Для того чтобы обеспечить возможность подписания электронных документов, были разработаны специальные технологии, названные по аналогии электронной подписью.

Электронная цифровая подпись (ЭЦП) – реквизит электронного документа, предназначенный для удостоверения аутентичности и защиты электронного документа от подделки.

ЭЦП считается одной из наиболее эффективных современных систем электронной идентификации и имеет много форм со следующим общим принципом функционирования.

Применяя специальные программно-аппаратные устройства, лицо создает два ключа: частный и публичный, называемые ключевой парой. С помощью односторонней хэш-функции из подписываемого документа лицо получает дайджест документа, который зашифровывается частным ключом.

Хэширование – преобразование входного массива данных произвольной длины в выходную битовую строку фиксированной длины так, чтобы изменение входных данных приводило к непредсказуемому изменению контрольной строки.

Хэш-функция – функция, с помощью которой осуществляется преобразование.

Дайджест сообщения – это уникальная символьная строка фиксированного размера, она является результатом обработки данных с помощью односторонней хэш-функции, задаваемой методом дайджеста.

Последовательность байтов, полученная в результате шифровки дайджеста документа, и есть ЭЦП, визуально представляющая собой последовательность буквенно-цифровых символов.

Такая последовательность символов присоединяется к документу, и документ отсылается адресату. С помощью публичного ключа подписавшегося адресат расшифровывает дайджест электронного документа, применив одностороннюю хэш-функцию, получает свой дайджест документа и сравнивает его с расшифрованным. В случае установления тождественности дайджестов адресат делает вывод о том, что документ не был изменен в процессе пересылки.

При использовании надёжной хэш-функции, вычислительно сложно создать поддельный документ с таким же хэшем, как у подлинного. Однако эти угрозы могут реализоваться из-за слабостей конкретных алгоритмов хэширования или ошибок в их реализациях.

Поэтому совершенствование алгоритмов получения ЭЦП является актуальной задачей, решение которой имеет высокую значимость в современном мире.

Предлагаемый метод решения данной проблемы основан на механизмах хаотической динамики. Динамическая система называется хаотической, если все ее траектории ограничены, но быстро расходятся в каждой точке. Таким образом, из определения динамической хаотической системы следует, что ее применение для защиты целостности документов автоматически выполнит одно из важнейших условий стойкости системы – распыление. Распыление предполагает, что похожие ключи (начальные условия) преобразуют текст в совершенно разные последовательности. Это достигается за счет экспоненциального расхождения траекторий хаотических систем. Второе не менее важное условие

стойкости – запутывание – указывает на то, что статистические свойства текста документа не обнаруживаются в дайджесте. Также немаловажным следствием из определения динамической хаотической системы является топологическая транзитивность, т.е. траектория хаотической системы является непрерывной и ограниченной. Это имеет высокую значимость как для сохранения состояния системы в тех пределах, которые допускает носитель информации, так и для покрытия всего пространства состояний дайджеста.

Для генерации ЭЦП можно воспользоваться дискретным отображением «кубическая парабола», поскольку важным является то, что генерируемая последовательность является хаотической в противопоставлении к используемым случайным последовательностям, подчиняющимся законам теории вероятности. Кроме того, дискретное отображение «кубическая парабола» имеет сплошной спектр, т.е. принимает бесконечное количество значений в определенной области. Она не имеет устойчивого математического ожидания и дисперсии, а потому алгоритм не может быть взломан с помощью дисперсионного, дифференциального и линейного анализа.

На основе предлагаемого метода создан программный продукт, позволяющий протестировать алгоритм генерации ЭЦП на основе дискретного отображения «кубическая парабола».

Для проверки надежности работы как предлагаемого алгоритма получения ЭЦП, так и других поддерживаемых программой алгоритмов, введен модуль, позволяющий вносить самые незначительные изменения в текст документа и генерировать дайджесты модифицированных текстов. Программа автоматически проводит сравнения дайджеста оригинального сообщения и дайджестов, полученных в результате внесения изменений в различные части текста. Кроме того, в программу введен ряд функциональных тестов, которые пользователь может провести автоматически, используя встроенный модуль тестирования.

Алгоритм позволяет пользователю изменять размер получаемого дайджеста. На сегодняшний день в РФ стандартом является ГОСТ 3411.94, определяющий размерность хэша равной 256 бит. Но не всем документам требуется такой уровень защищенности. Так, для проверки контрольной суммы, которая обычно применяется для установления факта потери данных при передаче, достаточно будет 32 бит, а для информации, содержащей коммерческую тайну, предпочтительно использовать дайджест в 512 бит и более. Алгоритм на основе дискретного отображения «кубическая парабола» не накладывает ограничений на размер дайджеста, однако скорость генерации возрастает вместе с увеличением длины дайджеста в битах.

Сравнение с такими широко распространенными и признанными алгоритмами создания ЭЦП как Tiger, Whilpool, SHA-1, MD5 показывает, что по скорости и ресурсоемкости алгоритм на основе дискретного отображения «кубическая парабола» им не уступает, а невозможность проведения дисперсионного, линейного и дифференциального анализов, отсутствие устойчивого математического ожидания и дисперсии и неограниченная размерность дайджеста делают его устойчивым к информационной атаке.

УДК 681.3

**ХАОТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЕ:
К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДСТВ
ПЕРСОНАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В МЕДИЦИНЕ**

Овчинкин О.В., аспирант, **Тарасов А.А.**, аспирант, **Залозных И.И.**, аспирант,
Довгаль В.М., докт. техн. наук, **Малыхин В.В.**, канд. техн. наук,
(г. Курск, Россия)

Displays of chaotic processes in cardiovascular system. Tools means of personal modeling in medicine.

В современном мире монотонно возрастает доля пациентов с сердечно-сосудистой патологией. Сердечно-сосудистые заболевания являются основной причиной естественной смертности населения России. Нарушения сердечного ритма повседневно встречаются во врачебной практике, спектр сердечных аритмий в этиологическом, клиническом, диагностическом, прогностическом плане чрезвычайно широк.

Преобладающее число систем в реальной действительности характеризуются хаотическими проявлениями, которые оказывают значительное влияние на многие системы организма человека, в том числе и на мозг и сердечно-сосудистую систему. Существует огромное количество факторов определяющих процессы регуляции сердечного ритма.

Хаотический процесс порождается неустойчивостью систем, относится к классу нестационарных и имеет сплошной спектр. Эти особенности не удовлетворяют условиям применения аппарата теории вероятностей и спектрального анализа. Математический образ сложного движения в нелинейных диссипативных динамических системах – странный аттрактор. К настоящему времени странные аттракторы обнаружены в множестве систем нашего организма работают в хаотическом или близком к нему режиме. Примером такой сложной системы может служить сердечнососудистая система человека.

Странный аттрактор – это аттрактор, не являющийся регулярным, в котором прогнозирование траектории, попавшей на аттрактор, невозможно, поскольку малая несоответствие начальных данных через некоторое время приводит к экспоненциальному расхождению прогноза с реальной траекторией.

Значительной проблемой остаётся сложность отображения полученной информации. Для получения полезной информации из кардиоритмограмм выполняется построение портрета странного аттрактора из числового ряда, являющимся оцифрованными значениями электроизмерений сердечного ритма. В результате работы алгоритма формируется многомерный образ странного аттрактора по заданному набору координат. При визуализации хаотического явления лица, принимающие диагностические решения, получают не только приемлемые формы представления объектов, но и практически состоятельный инструмент для восприятия, сравнения и сопоставления.

По исходному одномерному сигналу строится многомерный топологический портрет, в котором определяется список его дайджестов, что и является персональной моделью конкретного пациента. Реакции организма на применение медицинских технологий вызывает изменения значений дайджестов, что

приводит к последующей транспозиции топологического портрета во времени, которая позволяет отслеживать динамику течения заболевания пациента. В качестве дайджеста топологического портрета нами принят список центров масс в полупространствах пространства вложения странного аттрактора. Для анализа топологических портретов странных аттракторов используется понятие размерности. Размерность топологического портрета странного аттрактора определяется как наименьшее число компонент декартова произведения координат, при котором не обнаруживается ни одного повторения всех значений векторов в их траекторной последовательности. По алгоритму Джуа-Паркера вычисляется размерность топологического портрета.

Топологический портрет странного аттрактора имеет некоторое пространство вложения, представляющий собой набор векторов координат. В этом пространстве вложения вычисляется основной центр масс топологического портрета и осуществляется перенос в него начала координат. У топологического портрета существует не только основной вектор координат центра масс, но и существуют также вектора координат центров масс в полупространствах пространства вложения - дайджест заболевания пациента.

При осуществлении мониторинга, с обработкой текущей информации для прогнозирования состояний пациента, медицинские специалисты могут продуктивно использовать разработанный инструментарий персонального топологического моделирования, контроля течения болезни и выбора превентивных пособий, позволяющих корректировать состояний организма человека в условиях вредных производств.

УДК 681.325.4

ХАОТИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ, ПОРОЖДАЕМЫЕ ИТЕРИРУЕМОЙ ФУНКЦИЕЙ «ТРЕУГОЛЬНОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДОКУМЕНТАМИ

Борисов А.И., аспирант, **Жиляев Д.Л.**, аспирант, **Довгаль В.М.**, докт. техн. наук, **Гордиенко В.В.**, канд. техн. наук, **Малыхин В.В.**, канд. техн. наук
(г. Курск, Россия)

Iterated function "triangular transform" generates chaotic sequence. The basic quantitative characteristics of this function chaotic behavior are calculated. It allows to use it in algorithms in which the sequence of random numbers is necessary.

Рассмотрим простую итерируемую функцию – треугольное отображение

$$\Delta(x) = r \left(1 - 2 \left| \frac{1}{2} - x \right| \right).$$

Функция $\Delta(x)$ при $r > 1/2$ порождает хаотическую последовательность $x_0, \Delta(x_0), \Delta[\Delta(x_0)], \dots$. Она проста по форме, все величины, характеризующие хаотическое состояние, можно вычислить точно.

Основными количественные характеристики хаотического движения являются показатель Ляпунова, инвариантная мера, корреляционная функция Пуанкаре [1].

Показатель Ляпунова $\lambda(x_0)$ характеризует степень экспоненциального разбегания. В общем случае для треугольного отображения показатель Ляпунова равен $\lambda = \ln 2r$. Отсюда следует, что $\lambda > 0$ при $r > 1/2$, т. е. в этом случае в результате итерации мы теряем информацию о положении точки в $[0, 1]$. При $r < 1/2$ выполняется неравенство $\lambda < 0$, и тогда мы приобретаем информацию, так как все точки притягиваются к $x^* = 0$.

Распределение итераций одномерного отображения на единичном интервале, характеризуется инвариантной мерой, которая задает плотность итераций отображения.

Расчет плотности распределения можно вычислить с использованием интеграла:

$$\rho(y) = \int_0^1 dx \delta[y - f(x)] \rho(x)$$

Для треугольного отображения $\rho(x) = 1$ при $r = 1$ и хаотическая последовательность итераций $x_0, f^{(1)}(x_0), f^{(2)}(x_0) \dots$ равномерно покрывает интервал $[0, 1]$ – система эргодична.

Корреляционная функция $C(m)$ для отображения определяется следующим образом:

$$C(m) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \hat{x}_{i+m} \hat{x}_i$$

где $\hat{x}_i = f^{(i)}(x_0) - \bar{x}$; $\bar{x} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f^{(i)}(x_0)$.

Эта характеристика показывает, насколько отклонения от среднего значения, вычисленные через m шагов (т.е. \hat{x}_{i+m} и \hat{x}_i) связаны в среднем друг с другом.

Таким образом, в случае треугольного отображения имеем $C(m) = \frac{1}{12} \delta_{m,0}$, т.е. последовательность итераций дельта-коррелирована.

Данные свойства треугольного отображения можно использовать в алгоритмах, где необходима генерация хаотических последовательностей чисел. Для порождения шифрующей последовательности в качестве ключа генератора можно принять начальное положение (первое значение итерационной функции) и параметр r треугольного отображения. К значимой области применения отображения следует отнести системы управления документами для организации эффективной защиты информации от информационных атак.

Отображение возможно использовать в алгоритме проверки знания ключа без разглашения (аутентификации) на основе конечного числа тестов. Каждый тест должен состоять из следующих действий: выбор сервером аутентификации случайной позиции в последовательности, сгенерированной с использованием секретного ключа; предоставление клиенту аутентификации номера выбранной

позиции, расчет клиентом значения последовательности для выбранной сервером позиции на основе известного секретного ключа; передача полученного значения серверу; проверка сервером совпадения.

Еще одним возможным вариантом использования треугольного отображения, а именно свойства хаотического перемешивания, является случай, где необходимо получить равномерно распределенную характеристику, однозначно соответствующую неравномерной (например, нормально распределенной) характеристике. Для этого необходимо привести исходную характеристику к единичному интервалу $[0, 1]$ и после этого выполнить заданное количество итераций треугольного отображения.

УДК 681.3

АЛГОРИТМ ДВУМЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ МНОГОМЕРНОГО ПРОСТРАНСТВА

Залозных И.И., аспирант, Кошута А.А., аспирант, Овчинкин О.В., аспирант, Довгаль В.М., докт. техн. наук, Корольков О.Ф., канд. техн. наук
(г. Курск, Россия)

The article describes how to convert data from multidimensional space to two-dimensional space. This technique can be usefully implemented in many branches of science getting "invisible parameters". Their analysis can help to extrapolate an event evolution.

Многомерное пространство – это пространство, имеющее число измерений (размерность) более трёх. Возникновение понятия «многомерное пространство» связано с процессом обобщения самого предмета геометрии. В основе этого лежит открытие отношений и форм, сходных с пространственными, для многочисленных классов математических объектов (зачастую не имеющих геометрического характера). В ходе этого процесса постепенно сформировывалась идея абстрактного математического пространства как системы элементов любой природы, между которыми установлены отношения, сходные с теми или иными важными отношениями между точками обычного пространства.

Простейшими многомерными пространствами являются n -мерные евклидовы пространства, где n может быть любым натуральным числом. Подобно тому, как положение точки обычного евклидова пространства определяется заданием трёх её прямоугольных координат, «точка» n -мерного евклидова пространства задаётся n «координатами» x_1, x_2, \dots, x_n (которые могут принимать любые действительные значения); расстояние r между двумя точками $M(x_1, x_2, \dots, x_n)$ и $M''(y_1, y_2, \dots, y_n)$ определяется формулой (1):

$$r = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2}, \quad (1)$$

аналогичной формуле расстояния между двумя точками обычного евклидова пространства. С сохранением такой же аналогии обобщаются на случай n -мерного пространства и другие геометрические понятия. Так, в многомерное пространство рассматриваются не только двумерные плоскости, но и k -мерные плоскости ($k < n$), которые, как и в обычном евклидовом пространстве, опреде-

ляются линейными уравнениями (или системами таких уравнений).

В реализации данного алгоритма необходимо выделить несколько этапов:

1. Формирование входного массива вещественных или целых чисел, по которым пойдет расчет.
2. Подстановка данного массива в алгоритм формирования итоговой мерности пространства для двумерной визуализации[1] с целью нахождения D_z .
3. Разработка алгоритма.

Итак, после нахождения D_z входного цифрового массива – строится правильный D_z -многоугольник. Если вершин D_z -многоугольника будет превышать 360^0 , то следующие вершины будут повторять вершины, двигаясь по окружности. Центр окружности будет началом движения, а радиус R данного многоугольника будет длиной.

Правильный многоугольник можно выстроить по формуле:

$$x_i = x_0 + R * \cos \left(\varphi_0 + \frac{2 * \pi}{n} \right) \quad (2)$$

$$y_i = y_0 + R * \sin \left(\varphi_0 + \frac{2 * \pi}{n} \right), \quad (3)$$

где x_0, y_0 – координаты центра; φ_0 – угловая координата первой вершины; R – радиус описанной окружности вокруг правильного многоугольника.

Радиус вписанной окружности (r) равен

$$R * \cos \frac{\pi}{n}. \quad (4)$$

Значения цифрового массива вводим относительно r с тем учетом, что r – это 100%. Затем, начинаем движение вокруг окружности по направлению, заданному изначально: по часовой или против часовой оси, выстраивая следующую точку параллельно следующей оси.

Для программной реализации выделим следующие формулы, которые используются в данном алгоритме:

$$l = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, \quad (5)$$

где l – длина отрезка; x_1, y_1 – координаты начала отрезка; x_2, y_2 – координаты конца отрезка.

Уравнение прямой задается формулой

$$y = kx + b. \quad (6)$$

После начала движения будет необходимо вычислять положение следующей точки, и учитывать направление движения относительно следующей оси, то есть, наклонять вектор и откладывать на нем точку.

Примем тот факт, что у параллельных прямых одинаковый коэффициент наклона k и они отличаются только свободным членом b . Откладывая вектор от искомой точки, всегда будут образовываться 2 направления вектора, одно из которых необходимо исключать.

В общем виде решение нахождения 2 направлений вектора реализуется в системе уравнений:

$$\begin{cases} l = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \\ y_2 = k * x_2 + b \end{cases} \quad (7)$$

Решением общего вида системы уравнений (7) относительно x_2 и y_2 будет следующим:

$$(x_2, y_2) \rightarrow \left(\begin{array}{l} b - \frac{b + k^2 \cdot y_1 + k \sqrt{L^2 \cdot k^2 + L^2 - b^2 - 2 \cdot b \cdot k \cdot x_1 + 2 \cdot b \cdot y_1 - k^2 \cdot x_1^2 + 2 \cdot k \cdot x_1 \cdot y_1 - y_1^2 + k \cdot x_1}}{k^2 + 1} \\ \frac{b + k^2 \cdot y_1 + k \sqrt{L^2 \cdot k^2 + L^2 - b^2 - 2 \cdot b \cdot k \cdot x_1 + 2 \cdot b \cdot y_1 - k^2 \cdot x_1^2 + 2 \cdot k \cdot x_1 \cdot y_1 - y_1^2 + k \cdot x_1}}{k^2 + 1} \end{array} \right)$$

1 корень уравнения (x_2, y_2)

$$\left(\begin{array}{l} b - \frac{b + k^2 \cdot y_1 - k \sqrt{L^2 \cdot k^2 + L^2 - b^2 - 2 \cdot b \cdot k \cdot x_1 + 2 \cdot b \cdot y_1 - k^2 \cdot x_1^2 + 2 \cdot k \cdot x_1 \cdot y_1 - y_1^2 + k \cdot x_1}}{k^2 + 1} \\ \frac{b + k^2 \cdot y_1 - k \sqrt{L^2 \cdot k^2 + L^2 - b^2 - 2 \cdot b \cdot k \cdot x_1 + 2 \cdot b \cdot y_1 - k^2 \cdot x_1^2 + 2 \cdot k \cdot x_1 \cdot y_1 - y_1^2 + k \cdot x_1}}{k^2 + 1} \end{array} \right)$$

2 корень уравнения (x_2, y_2)

Затем исключаем 1 корень уравнения (в зависимости от выбранного направления) и проводим прямую от предыдущей точки до вычисленной.

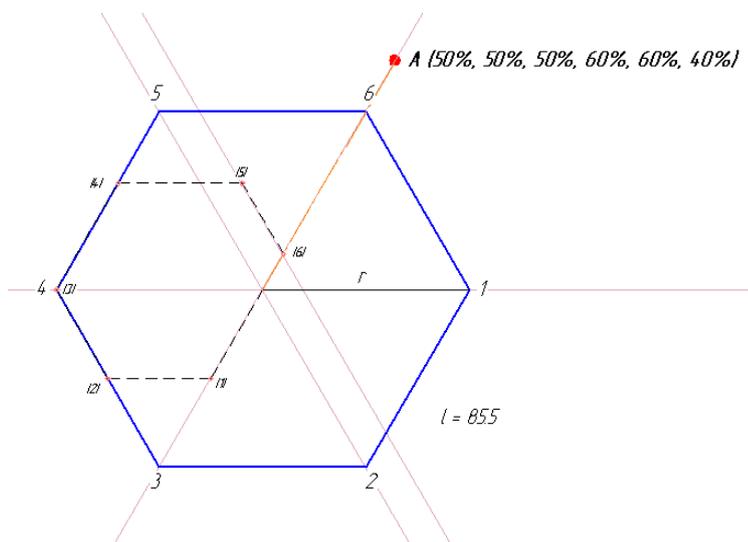


Рис.1.

После нахождения последней точки i кортежа K – соединяем центр с последней точкой и находим уравнения прямой. Заключительным этапом будет откладывания расстояния векторной суммы i кортежа K по уравнению (1) и по полученному уравнению прямой.

Для наглядного примера возьмем 6-мерное пространство и построим точку A с координатами (50%,50%,50%,60%,60%40%)

от r . Выбранное движение – по часовой стрелке.

Данный алгоритм позволяет выполнять многомерную свертку в двумерную плоскость, который дает возможность получить новые сведения, которые нельзя извлечь из исходного цифрового массива. Вместе с тем в данном алгоритме целесообразно реализовать масштабирование двумерного изображения и механизм переноса точки начала координат в любую точку, заданную курсором.

Литература: 1. И. И. Залозных, С.Г. Бородин, В.М. Довгаль, А.А. Кошута. “Алгоритм

формирования итоговой мерности пространства медико-биологических сигналов для двумерной визуализации”: Сборник материалов Международной научно-технической конференции «Диагностика-2009», 2009, т. 2. – С. 86-89. 2. Parker T. S., Chua L. O. “Practical Numerical Algorithms for Chaotic Systems”, New York, Springer-Verlag, 1969.

УДК 681.5

ПОДСИСТЕМА БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ ОКОЛОЗЕМНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Зверев П.С., аспирант, **Довгаль В.М.**, докт. техн. наук,

Корольков О.Ф., канд. техн. наук (г. Курск, Россия)

The considered software product is intended for recognition of artificial space objects among set of natural objects.

Загрязненность околоземного космоса растет с увеличением мощи используемых для запуска ракет. Разрушаются спутники, находящиеся на орбитах более 20 лет после запуска, давно исчерпавшие свои энергетические ресурсы и попавшие в разряд космического мусора. Особая опасность космического мусора связана с тем, что он перемещается в пространстве с огромной скоростью.

Первый случай столкновения двух искусственных спутников в космосе произошел 11 февраля 2009-го. Спутник американской компании спутниковой связи Iridium столкнулся с российским спутником военного назначения "Космос-2251".

Целью работы является обеспечение подсистемы безопасности космических полетов путем разработки программного продукта, предназначенного для своевременного обнаружения искусственных космических объектов и дальнейшей передачи информации о них на другие искусственные объекты или ЦУП.

Процесс распознавания искусственных объектов протекает в несколько этапов. На первом этапе происходит получение данных с фото-матрицы космического аппарата и передача их разработанной программе. На втором этапе программа, на основании полученных данных, формирует треки искусственных объектов. На третьем этапе данные о распознанных искусственных объектах и их треках передаются на ЦУП и другие искусственные объекты.

Следует обратить внимание на то, что сложность второго этапа заключается в наличии у космического аппарата, как и у любого искусственного космического объекта, шести степеней свободы: смещение вдоль осей X, Y и Z; тангаж; рысканье; вращение.

Поэтому для спутника положение всех космических объектов будет изменяться, причем траектория как искусственных, так и естественных объектов не будет поддаваться прогнозированию (будет детерминировано хаотичной). Для упрощения траектории естественных объектов можно было бы поставить дополнительные сложные и дорогостоящие технические средства стабилизации, но разработанный программный продукт позволяет избежать этого, тем самым сэкономить денежные средства.

Разработанный программный продукт включает в себя как модуль распо-

знавания, так и модули, имитирующие изображение на фото-матрице, т.е. программа может сама себя тестировать.

Для создания программного продукта необходимо было выполнить 4 основные задачи: создать модули программ для имитации изображения на фото-матрице, модули формирования треков искусственных космических объектов, модули программ для визуализации работы программы, провести экспериментальную проверку в схеме конкретного приложения.

Входными данными для программно-алгоритмического средства являются данные, сгенерированные программой. Для получения входных данных, максимально приближенных к данным, которые формировались бы на космическом аппарате, необходимо при имитации данных с фото-матрицы учитывать степени свободы космического аппарата. Выходными данными – параметры найденных движущихся объектов.

Разработанный алгоритм распознавания искусственных космических объектов выполняется в шесть этапов.

На первом этапе происходит получение данных о двух последовательных кадрах с фото-матрицы КА. Под данными понимается упорядоченная последовательность координат объектов на фото-матрице, которые были зафиксированы ею в текущем кадре.

Второй этап заключается в формировании на основании данных о первом кадре множества структур (структуры первого кадра). Под структурой понимается набор следующих данных: координаты объектов первого кадра и их метрики связей. Количество объектов в структуре определяется опытным путем и влияет на точность сравнения разных структур. В качестве метрики связи принято Евклидово расстояние между участвующими в сопряжении объектами.

Суть третьего этапа заключается в следующем. На основании данных о втором кадре формируются все возможные структуры (структуры второго кадра). Во время процесса формирования отбираются структуры, для которых существует подобная структура первого кадра. Две структуры считаются подобными, если их соответствующие метрики связей полностью совпадают. В результате отбора получается множество пар структур, каждая из которых включает в себя структуры первого и второго кадра.

На четвертом этапе, на основании полученных пар структур, рассчитываются параметры аффинных преобразований (сдвига и поворота). Так как расстояния до звезд крайне велико (расстояние до ближайшей звезды – 4,3 светового года или 40 трлн. км), то результат воздействия тангажа и рысканья (вращений вокруг осей OX и OY соответственно) на объекты на фото-матрице КА сводится к их смещению вдоль осей OY и OX соответственно. Поэтому значения смещений, обусловленных воздействием тангажа и рысканья, могут быть объединены со значениями смещений вдоль осей OY и OX . Таким образом, должны быть рассчитаны следующие параметры аффинных преобразований: сдвиги вдоль осей OX и OY , угол поворота вокруг оси OZ относительно центра фото-матрицы. Сдвиг вдоль оси OZ не рассматривается, так как не оказывает влияния на положение объектов на фото-матрице.

Пятый этап заключается в преобразовании координат объектов структур

второго кадра с помощью аффинных преобразований, параметры которых были найдены на предыдущем этапе.

После этого на шестом этапе происходит объединение данных первого кадра и измененных данных второго кадра. В ходе объединения происходит удаление объектов, данные о которых были обнаружены в обоих кадрах. Таким образом, после перечисленных действий формируется объединенный кадр, на котором остаются только искусственные космические объекты.

Программно-алгоритмическое средство разработано с использованием Microsoft Visual Studio 2005 и Borland C++ Builder 6, тестировалось на компьютере с процессором Pentium IV 3 ГГц и с 1ГБ оперативной памяти. Проводилось тестирование программно-алгоритмического средства с помощью данных, сгенерированных программой. Входные данные генерировались программой в течение 10 часов. Ошибка распознавания происходила в том случае, когда положение искусственного и естественного объектов совпадали. В остальных случаях ошибки распознавания не наблюдались.

Таким образом, разработанное программно-алгоритмическое средство позволяет распознавать искусственные космические объекты на фоне естественных космических объектов. Использование предлагаемого программного продукта позволяет исключить сложные и дорогостоящие технические средства, требуемые для стабилизации траектории естественных космических объектов, тем самым, уменьшая общую себестоимость комплекса, в котором будет использоваться данный программный продукт.

УДК 681.325.4

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДОКУМЕНТООБОРОТОМ С БЛОКОМ ГЕНЕРАЦИИ ЧИСЛОВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ЛОГИСТИЧЕСКОГО ОТОБРАЖЕНИЯ

Жиляев Д.Л., аспирант, **Борисов А.И.**, аспирант, **Довгаль В.М.**, докт. техн. наук, **Гордиенко В.В.**, канд. техн. наук, **Малыхин В.В.**, канд. техн. наук
(г. Курск, Россия)

Use of the chaotic dynamics mechanism for creation of a document circulation system protected from information attacks is considered.

Ключевым элементом в системе управления документооборотом является сервер хранения. Одними из основных алгоритмов, которые реализует указанный сервер, являются алгоритмы: аутентификации; шифрования; индексации.

Для указанных алгоритмов, как правило, применяется блок генерации числовых последовательностей для задания начальных условий. Конкретная реализация такого блока зависит от структурно-функциональной организации системы управления документооборотом, однако, по сути своей такие механизмы делят на генератор псевдослучайных чисел (ГПСЧ) и генератор случайных чисел (ГСЧ).

Любой ГПСЧ с ограниченными ресурсами рано или поздно зацикливается — начинает повторять одну и ту же последовательность чисел. Длина циклов ГПСЧ зависит от самого генератора и в среднем составляет около $2n/2$, где

n – размер внутреннего состояния в битах, хотя линейные конгруэнтные и LFSR-генераторы обладают максимальными циклами порядка $2n$. Если ГПСЧ может сходиться к слишком коротким циклам, такой ГПСЧ становится предсказуемым и является непригодным для применения, например, в процессах криптографии или стеганографии. Наравне с существующей необходимостью генерировать легко воспроизводимые последовательности случайных чисел, также существует необходимость генерировать непредсказуемые числовые ряды. Этот класс генераторов называют генераторами случайных чисел (ГСЧ — англ. random number generator, RNG). Такие генераторы чаще всего строятся из комбинации криптостойкого ГПСЧ и внешнего источника энтропии, а такую комбинацию принято понимать под ГСЧ).

Однако как показала практика, и те и другие генераторы рано или поздно становятся уязвимы для опытного криптоаналитика. В связи с этим, в указанных алгоритмах предлагается использовать математический аппарат хаотической динамики. Теория хаоса – математический аппарат, описывающий поведение некоторых нелинейных динамических систем, подверженных, при определённых условиях, явлению, известному как хаос, которое характеризуется сильной чувствительностью поведения системы к начальным условиям.

Исходя из свойств детерминированной динамической системы, приводящих к хаотическому поведению: неустойчивость, нелинейность, нелинейное ограничение и основные свойства данных систем с хаотическим поведением: воспроизводимость, перемешивание – можно предположить, что применение теории хаоса в механизме генерации числовой последовательности в системах управления документооборота позволит создать высокий уровень временной сложности для проведения информационной атаки.

В теории хаоса существует несколько механизмов генерации числовых последовательностей (в терминах теории хаоса – «отображений»): отображение «зуб пилы», логистическое отображение, отображение «тент». Нами предлагается применять для генерации числовых последовательностей логистическое отображение, из-за простоты реализации и эффективности в контексте защиты от информационной атаки.

Для логистического отображения в качестве характеристики возможно использовать вырез из сгенерированной последовательности, входной параметр которой рассчитан из строки текста.

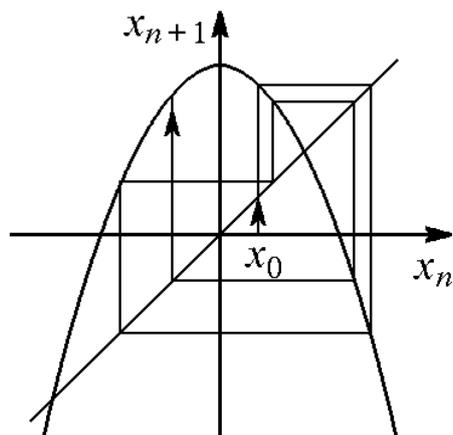


Рис. 1.

Обратимся к формуле логистического отображения $X_{n+1} = 1 - \partial X_n^2$, где X_n – динамическая переменная, ∂ – параметр, от величины которого зависит характер динамики.

На рис. 1 показано логистическое отображение при значении параметра $\partial=2$, а также итерационная диаграмма, иллюстрирующая динамику на нескольких первых шагах начального состояния X_0 .

Таким образом, реализация системы управления документооборотом с подсистемой

защиты от информационных атак, содержащей блок генерации числовой последовательностей на основе логистического отображения, позволит повысить надежность и эффективность указанного блока и всей системы в целом.

УДК 681.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКОРОСТИ ПЕРА ДЛЯ СЕГМЕНТАЦИИ СИМВОЛОВ РУКОПИСНЫХ СЛОВ

Эзирим Кеннет Угона, аспирант, **Довгаль В.М.**, докт. техн. наук
(г. Курск, Россия)

Segmentation is one of the major problems in recognition of handwritten symbols. In this paper a segmentation method for segmenting handwritten string into constituent symbols by searching for symbol occurrence is demonstrated.

Предварительная обработка играет значительную роль в распознавании образов. В большинстве случаев распознавания образов, сегментация составляющие элементы образа очень важна для идентификации и описания характеристик упомянутого образа. В данной статье рассматривается, как скорость пера влияет на процесс сегментации слов. Главная цель – определить совокупность точек, разделяющие слова на составляющие символы или буквы.

Было опубликовано много статей по сегментации букв (символов) особенно в области оптического распознавания символов (Optical character recognition OCR) [1] [2]. Общий признак в разделении слов на символы является пространство или пробел, который оказывается между символами. В таких случаях применяется вертикальная и горизонтальная проекции [3]. Но при отсутствии пробелов между символами в слове, эти способы становятся ошибочными и непригодны для определения места разрыва между символами.

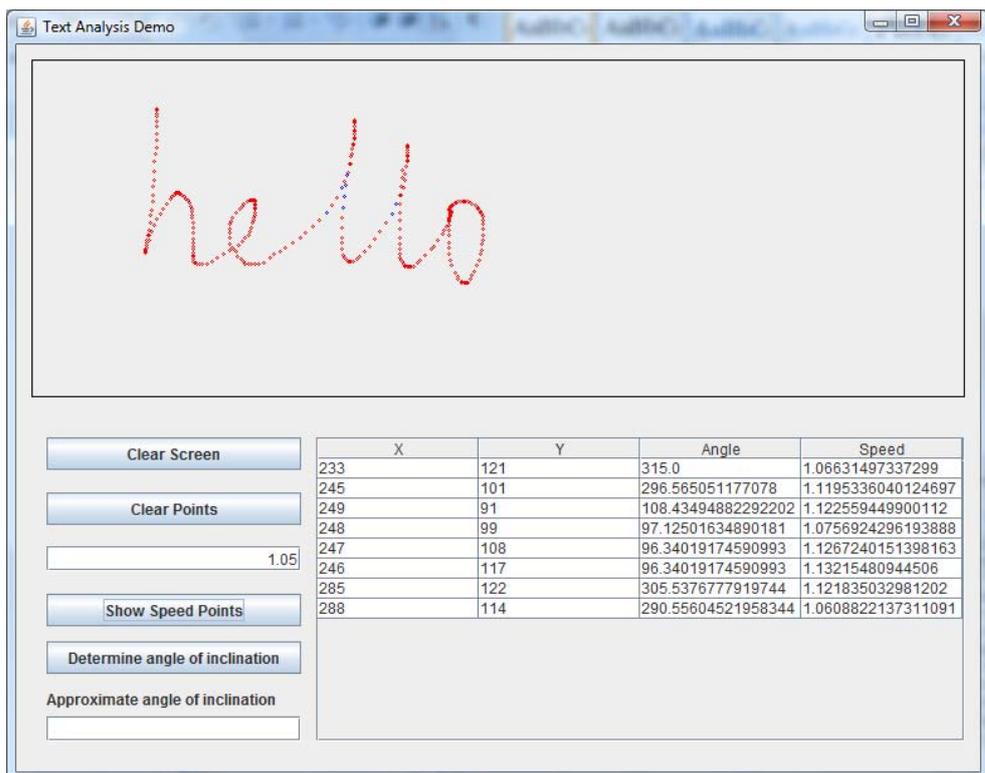
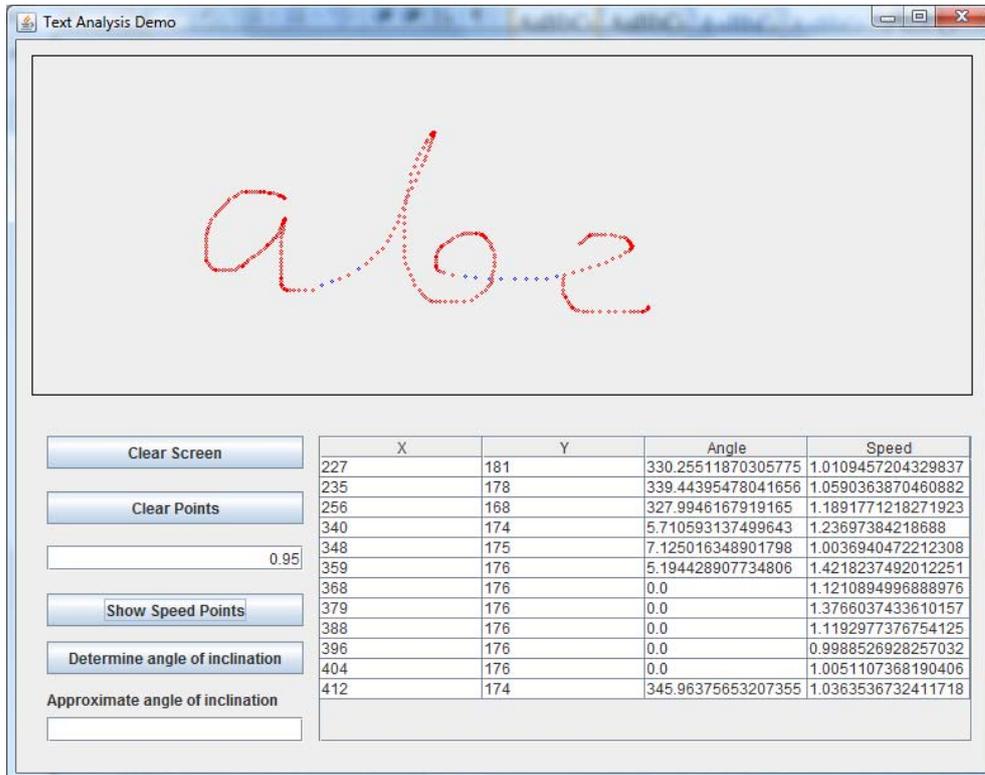
Исследование, которое Рапнхейдур Кальсдоттир проводил [5] на способы введения текстовой информации, рассматриваются разные модели для введения рукописных данных. Было отмечена важность скорости пера в процессе воспроизведения рукописи. По результату наблюдения, акцентируется внимание релевантности времени как при распознавании рукописных символов. Очевидно, что скорость пера пропорциональна скорости воспроизведения рукописи, но варьируется в разных временах, особенно в местах соединения двух символов и в тех местах, где присутствуют резкий поворот или кривая малого радиуса кривизны. Это происходит из-за того, что писатель дает мало внимание к образующим штрихам в интервале перехода от описания одной буквы в описание другой буквы. Итак, писатель перемещается в сравнительно большое пространство (расстояние) за короткое время. В конечном счете, получается большая скорость в данной положении в траектории воспроизведении рукописи.

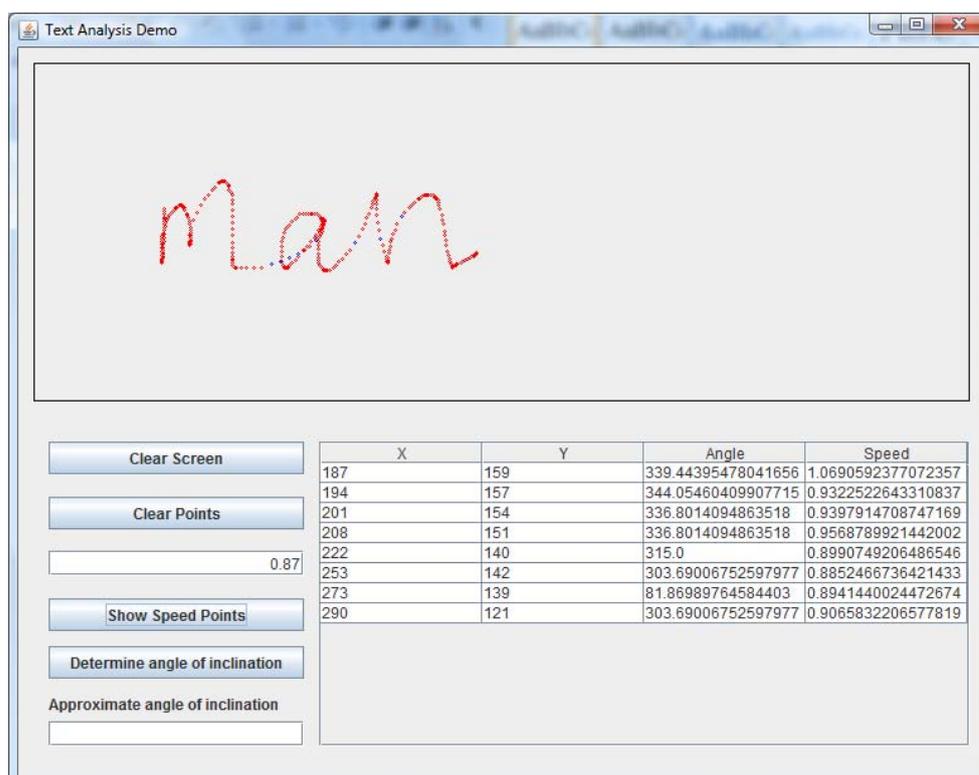
Результаты, полученные при моделировании данного процесса, отображаются в рисунках 1, 2, 3. Очевидно, что точки в траектории рукописи с значительно высокой скоростью, концентрируются именно в местах соединения символов.

Пусть S – рукопись (штрих). S – Это совокупность точек (пикселей) полученных в интервале времени контакта с сенсорным экраном. Расстояние между точками определяется формулой для вычисления Эвклидово расстояния.

Итак, скорость в определенном моменте времени определяется отношением расстояния к времени.

С помощью пороговой функции, мы можем по полученному значению скорости определить те точки, имеющие большую скорость. Результат экспериментов утверждают, что координаты тех точек с значительной большой скоростью по сравнению с другими точками, совпадает с теми местами где ожидают разрыв между символами.





Литература: 1. A. Amin, "Off line Arabic character recognition – a survey", Proceedings of the International Conference on Document Analysis and Recognition, vol. 2, pp. 596-599, 1997. 2. Y. Lecun, L. Bottou, Y. Bengio, P. Haffner, "Gradient based learning applied to document recognition", Proceedings of the IEEE, vol. 86, no.11, IEEE, pp. 2278- 2324, USA , 1998. 3. Alan L. Harvey. Handwritten character segmentation issues. Electrical Engineering Department RMIT Melbourne 3000. International symposium on signal processing and its applications, ISSPA, Gold Coast Australia, 25-30 August 1996. 4. An approach to offline Arabic character recognition using neural recognition S.N. Nawaz, M. Sarfraz, A.Zidouri and W.G. Al-Khatib. Sarfraz@kfupm.edu.sa 5. Ragnheidur Karlsdottir Issues in Text Input. Comparison of cursive models for handwriting instruction. Perceptual and Motor Skills, 85(3):1171 - 1184, 1997.

УДК 621.313:62.192

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Петков А.А., канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)

The analysis of parametrical synthesis methods of high-voltage pulse test devices is resulted in the report.

При испытаниях электротехнического и электронного оборудования на стойкость к воздействию мощных электромагнитных факторов искусственного и естественного происхождения широко используются высоковольтные импульсные испытательные устройства (ВИИУ), создаваемых на базе емкостных накопителей энергии. Многообразие испытательных импульсов и постоянное развитие нормативной базы, регламентирующей испытания, ставят задачу синтеза разрядных цепей ВИИУ, как одну из основных задач их проектирования.

Под параметрическим синтезом эквивалентной электрической схемы разрядных цепей ВИИУ будем понимать вычислительную процедуру, конечным

результатом которой является набор числовых значений параметров элементов электрической схемы разрядной цепи \overline{P}_E^* , обеспечивающих формирование в заданной нагрузке импульсного воздействия (ИВ) с требуемым набором амплитудно-временных параметров (АВП) \overline{V}_P^* [1].

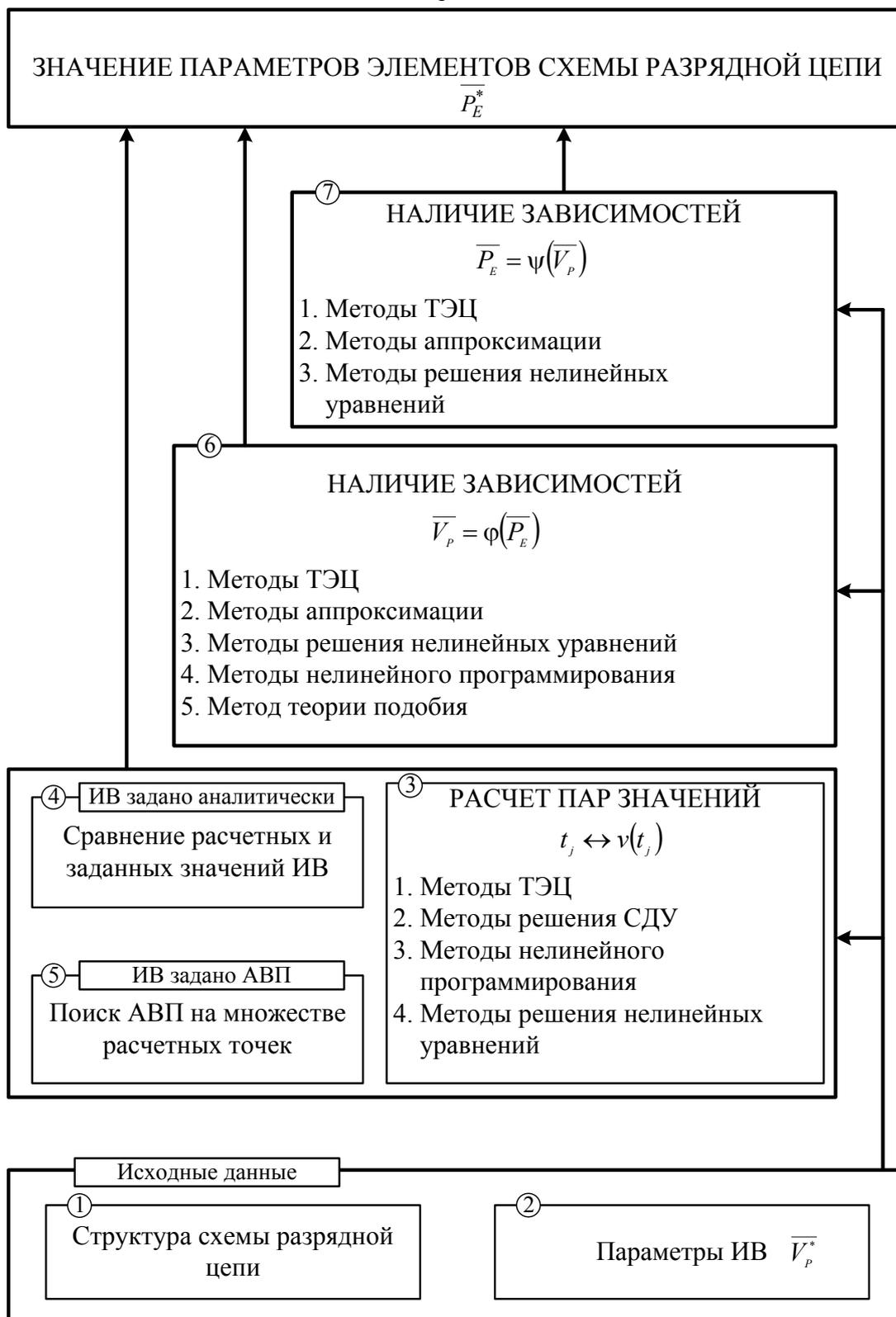


Рис. 1. Структура методов параметрического синтеза разрядной цепи высоковольтного импульсного испытательного устройства.

Параметрический синтез производится на основе следующих основных принципов: принципа иерархичности; принципа учета способа идентификации импульсного воздействия; принципа учета направленности практической потребности и принципа оптимальности [2, 3].

Согласно принципу иерархичности, первым этапом синтеза является синтез разрядной цепи ВИИУ по номинальным значениям характеристик импульсного воздействия.

Структура методов параметрического синтеза разрядной цепи по номинальным значениям параметров импульсного воздействия, в зависимости от степени разработки методов определения параметров элементов разрядной цепи, показана на рис. 1.

Исходными данными параметрического синтеза являются структура разрядной цепи (блок 1) и параметры импульсного воздействия (блок 2).

Наиболее универсальным способом параметрического синтеза является способ многовариантных расчетов параметров ИВ при различных значениях параметров элементов разрядной цепи и выбора наиболее подходящего варианта (блоки 3–5). В данном случае процедура синтеза основывается на представлении ИВ в виде однозначно сопоставляемых пар значений

$$t_j \leftrightarrow v(t_j), \quad (1)$$

где t_j – j -ый момент времени; $v(t_j)$ – значение ИВ в j -ый момент времени.

Далее на множестве пар значений (1) производится определение требуемых АВП ИВ (блок 5) либо сравнение требуемого значения $v^*(t_j)$ с расчетным $v(t_j)$ (блок 4). Обычно при таком способе формулируется и решается задача нелинейного программирования, например [4, 5]. Данный подход наряду с универсальностью имеет ряд значительных недостатков, связанных в первую очередь с применяемыми методами (проблемы решения "жестких" дифференциальных уравнений, неоднозначность решения задачи нелинейного программирования, отсутствие общих методов решения нелинейных уравнений и т.д.). Дополнительную сложность вносят различные способы идентификации импульсного воздействия. Все это требует значительной математической подготовки для синтеза конкретного схемного решения разрядной цепи ВИИУ и способа идентификации ИВ.

Задача параметрического синтеза резко упрощается при наличии моделей выходных параметров ИВ, отражающих в явном виде их зависимость от параметров элементов разрядной цепи (блок 6):

$$\overline{V}_P = \varphi(\overline{P}_E), \quad (2)$$

где \overline{V}_P – набор АВП ИВ; \overline{P}_E – набор параметров элементов разрядной цепи; $\varphi(\bullet)$ – функциональные зависимости.

Недостатком данного способа является то, что получить указанные модели путем аналитических преобразований исходных данных удастся лишь для ограниченного класса разрядных цепей ВИИУ. В общем же случае для построения моделей данного вида требуется применение численных методов математического анализа.

Наличие моделей, отражающих зависимость параметров элементов разрядной цепи от параметров ИВ (блок 7), является предельным упрощением решения задачи параметрического синтеза разрядной цепи.

$$\overline{P}_E = \psi(\overline{V}_P), \quad (3)$$

где $\psi(\bullet)$ – функциональные зависимости.

Недостатком данного способа является то, что указанные модели могут быть получены только с использованием численных методов математического анализа, за исключением моделей отдельных параметров упрощенных схем разрядной цепи, которые могут быть получены путем аналитических преобразований исходных данных. Однако использование моделей, полученных из упрощенных схем, возможно лишь для оценочных расчетов, и не может быть применено в реальной процедуре проектирования ВИИУ.

Аналогичной является структура синтеза по допускам и синтеза с учетом критериев надежности. При этом для синтеза разрядных цепей ВИИУ дополнительно применяются методы теории чувствительности и допусков, теория вероятности и математической статистики, а также теория надежности.

Литература: 1. Петков А.А. Формализация описания структур разрядных цепей высоковольтных импульсных испытательных устройств / Петков А.А. // Электротехніка і електромеханіка. – 2007. – №1. – С. 73 – 77. 2. Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтных импульсных испытательных устройств / А.А. Петков // Труды 12-й международной научно-технической конференции "Физические и компьютерные технологии" (7-8 июня 2006 года г. Харьков). – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2006. – С. 224 – 226. 3. Кравченко В.И. Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии / В.И. Кравченко, А.А. Петков // Электротехніка і електромеханіка. – 2007. – №6. – С. 70 – 75. 4. Губарев Г.Г. Оптимизация параметров импульсных источников питания / Г.Г. Губарев, В.П. Северин // Электричество. – 1983. – №1. – С. 64 – 65. 5. Губарев Г.Г. Трехкритериальная оптимизация импульсных источников питания / Г.Г. Губарев, В.В. Конотоп // Известия Академии наук СССР. Энергетика и транспорт. – 1984. – №6. – С. 66 – 73.

УДК 621.941.042

ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАШИН НА ОСНОВЕ ИХ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ларшин В.П., докт. техн. наук, **Золотов Н.Н.**, **Щербина С.К.**

(г. Одесса, Украина)

The technique is described and examples are given for structural arrangements computer modeling at the design parameters choosing stage.

Усложнение современных конструкций механизмов и машин, вызванное необходимостью резкого повышения их КПД и использования нетривиальных режимов работы связано с решением вопроса об их принципиальной работоспособности, с одной стороны, и с поиском конструктивных форм и параметров, обеспечивающих оптимальную их работу, с другой.

Изготовление натуральных макетов и опытных образцов этих конструкций сопряжено с высокой трудоёмкостью и зачастую не позволяет найти рациональное сочетание конструктивных форм и параметров, при которых выполняемая функция машины надёжно обеспечивается за счёт наилучшего их соче-

тания и при наименьшей себестоимости изготовления.

Эффективным средством виртуального имитационного (и анимационного) моделирования является компьютерное моделирование конструкций и технологической систем с применением современных конструкторских САПР. Ниже, в качестве примера, рассмотрены две конструкции для компьютерного моделирования: бесступенчатый регулятор скорости в трансмиссии мобильных (и стационарных) машин и принципиально новый базовый механизм двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Моделирование и исследование этих конструкций выполнено в среде конструкторского проектирования Autodesk Inventor 2010.

Описание первой конструкции. В автомашинах, танках, тракторах, металлорежущих станках, подъёмно-транспортных устройствах и в других машинах и механизмах, используемых в гражданской и военной технике, для эффективной работы требуется бесступенчатое регулирование частоты вращения выходного вала от нуля до максимальной величины при номинальной частоте вращения входного вала (выход первичного двигателя). Однако существующие регуляторы скорости имеют сложную конструкцию с дискретным переключением механических передач. В качестве примера можно назвать классическую коробку переключения передач автомобилей. Для обеспечения бесступенчатого

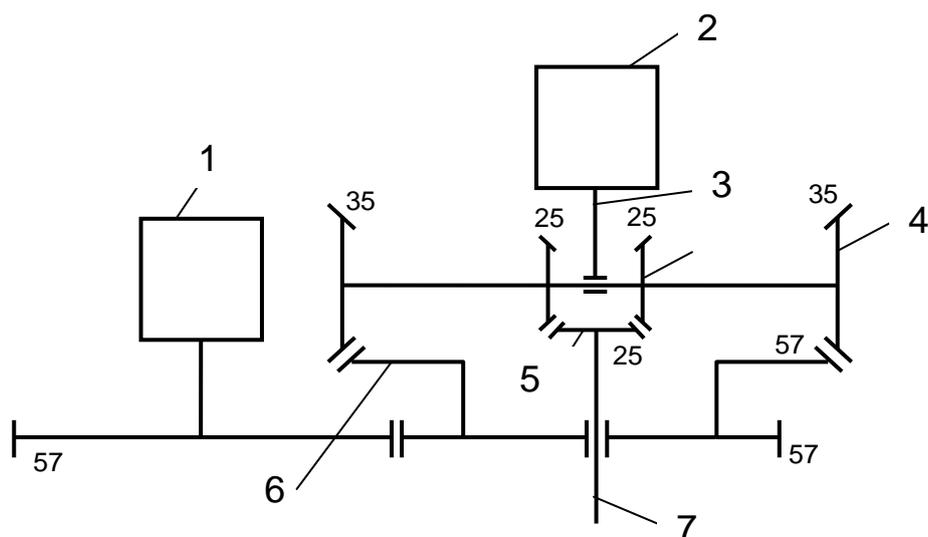


Рис.1. Кинематическая схема бесступенчатого регулятора скорости: 1, 2 – гидротрансформатор и первичный двигатель; 3 – входной вал; 4...6 – шестерни конические с указанным числом зубьев (от 25 до 57); 7 – выходной вал.

регулирования в трансмиссии автомобилей используют гидромеханические устройства, а также электрические регуляторы скорости.

В предлагаемом бесступенчатом регуляторе скорости машин и механизмов (рис.1), выполненном на основе дифференциала, массогабаритные

части – гидротрансформатор или электрическая машина – по сравнению с существующей конструкцией загружены только на половину мощности.

Вторая половина мощности, минуя гидротрансформатор (или электрическую машину), поступает через дифференциал механической передачи. Это позволяет уменьшить габариты гидротрансформатора (или электрической машины). Предлагаемую конструкцию (рис.2) можно использовать и в качестве базы для главной передачи автомашин, так как она обеспечивает управляемую разную (изменяемую по мере необходимости) частоту вращения ведущих колёс.

Описанный бесступенчатый регулятор скорости можно применить также

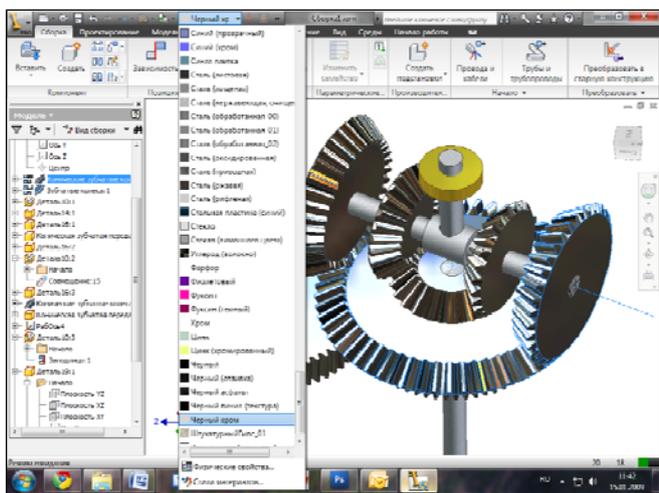


Рис.2. Фрагмент компьютерной модели бесступенчатого регулятора скорости в программе Autodesk Inventor.

на стационарных машинах и установках, например на металлорежущих станках. Для этого в первичной конструкции заменяют гидротрансформатор 1 и ДВС 2 (рис.1) на соответствующие электрические машины. В этом случае дифференциал работает как редуктор, расширяя диапазон регулирования угловой скорости выходного вала электродвигателя, а электродвигатель, заменяющий ДВС, работает при номинальной частоте вращения выходного вала.

Описание второй конструкции. Увеличение КПД в ДВС можно осуществить за счёт сдвига верхней мёртвой точки в сторону опережения

частоты вращения коленчатого вала. Этот сдвиг обеспечивают за счёт установки шатунной шейки вала в направляющей ползуна с обеспечением возможности перемещения в этой направляющей, а также за счёт установки направляющей под углом к поперечному сечению цилиндра (рис.3,а).

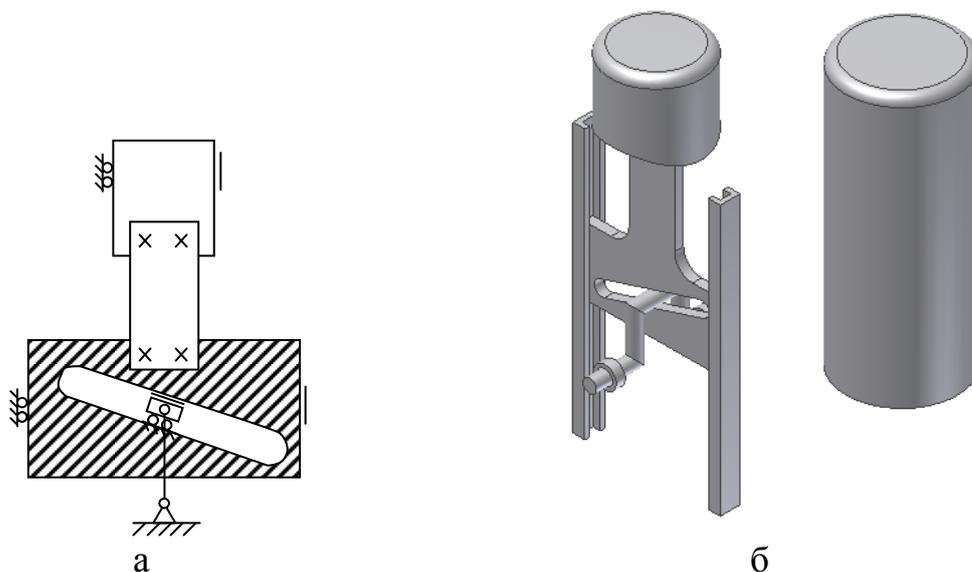


Рис.3. Кинематическая схема механизма (а) и фрагмент её компьютерной модели (б) применительно к новой конструкции ДВС.

Установка штока вместо шатуна позволяет устранить боковое давление на поршень и, следовательно, упростить его конструкцию (используется круглое поперечное сечение поршня вместо традиционного овального сечения). Цилиндр и поршень в предлагаемой конструкции ДВС работают по классической схеме возвратно-поступательного движения с одним отличием: со штоком соединены поршень и ползун, причём ползун имеет возможность совершать

возвратно-поступательные движения в картере автомобиля (рис.3,б). В направляющей размещена шейка с ползунком, которые имеют возможность перемещения в этой направляющей. На ползуне размещён палец, с которым соединён шток.

Последовательность разработки компьютерной модели механизма покажем (выборочно) на примере второй конструкции.

После установки среды Autodesk Inventor 2010 выполняют следующие действия: для создания нового файла нажать (Ctrl+N), появится диалоговое окно; перейти на вкладку «Метрические» (Metric); выбрать «Обычный» (мм).iam; нажать кнопку «Enter».

Далее рассмотрим создание ползуна (рис.4). Для этого: нажать «Создать» (N) и кликнуть по «пространству сборки». Нарисовать эскиз, пользуясь инструментами «Прямоугольник» (75x120 мм), «Окружность» (Ø17). Задать отступы от контура прямоугольника по 20 мм.

Далее рассмотрим создание ползуна (рис.4). Для этого: нажать «Создать» (N) и кликнуть по «пространству сборки». Нарисовать эскиз, пользуясь инструментами «Прямоугольник» (75x120 мм), «Окружность» (Ø17). Задать отступы от контура прямоугольника по 20 мм.

На панели инструментов перейти на вкладку «Модель» и выбрать инструмент «Выдавливание». После дополнительных построений получаем рис.5.

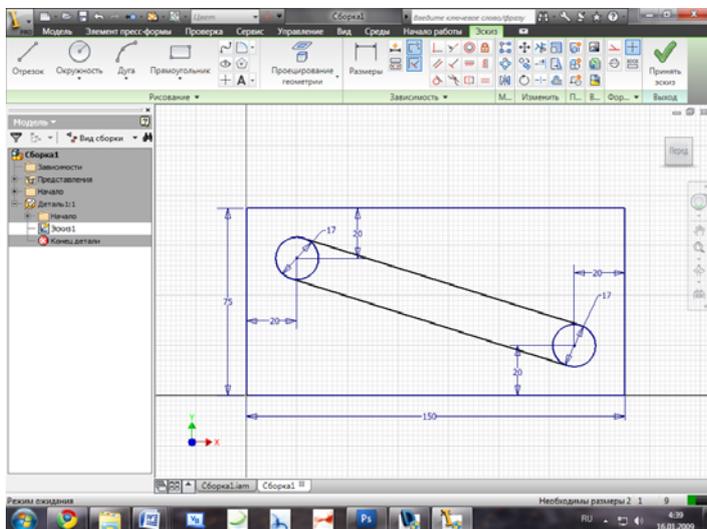
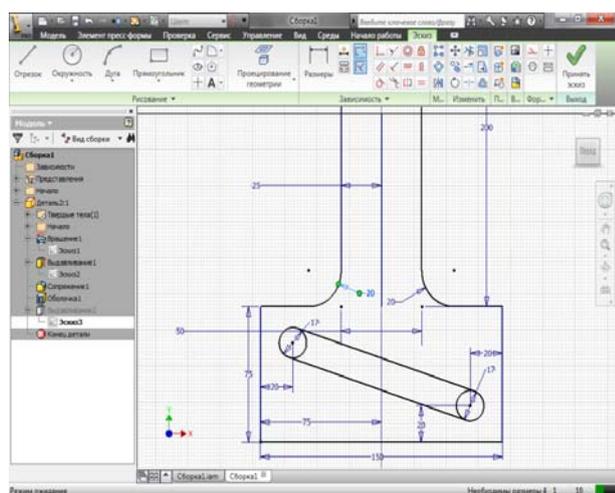
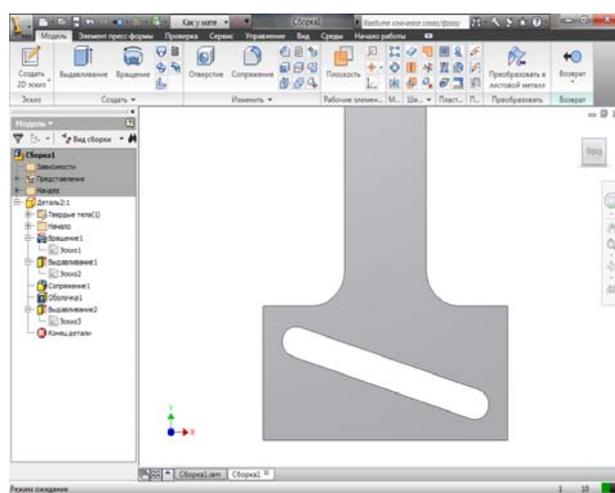


Рис.4. Начало последовательности действий для создания ползуна.



а



б

Рис.5. Продолжение последовательности создания ползуна на этапе применения эскиза до (а) и после (б) выполнения команды (Ctrl+Enter).

Разработанные в среде Autodesk Inventor 2010 компьютерные модели описанных выше конструкций позволили наглядно продемонстрировать и исследовать их работоспособное состояние.

УДК 539.3

РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТАКТНОЙ ПАРЫ РОЛИК-КОЛЬЦО ПОДШИПНИКА КАЧЕНИЯ

Зенкевич Ю.А., Овчаренко В.В., канд. техн. наук,
Симсон Э.А., докт. техн. наук (г. Харьков, Украина)

The optimization calculation of rolling body's formative surface and butt-end surface of the roller bearing was solved. Surfaces of internal and external rings optimization were solved too. The row of variation calculations is executed.

Современные тенденции в транспортном машиностроении свидетельствуют о постоянном стремлении к росту долговечности узлов, в том числе подшипниковых узлов железнодорожного вагонного состава и локомотивов. Они сводятся к постоянному усовершенствованию традиционных буксовых подшипников качения и их комбинаций для увеличения срока службы и снижения материалоемкости. При проектировании таких узлов необходимо решать целый ряд задач, относящихся к различным научным дисциплинам. Задача расчета и оптимизации контактной пары ролик-кольцо одна из них.

В ходе решения осуществлено построение модели контактной задачи подразумевающие следующие этапы: упрощение геометрической модели; построение пространства варьируемых параметров; генерация сетки конечных элементов.

Найдена максимальная нагрузка на ролик. Проведен оптимизационный расчет для контакта ролик – внутреннее кольцо, в результате которого получены оптимальные по критерию минимизации максимальных контактных напряжений профили боковой поверхности ролика для строго цилиндрической и выпуклой дорожек качения (рис. 1, рис. 2).

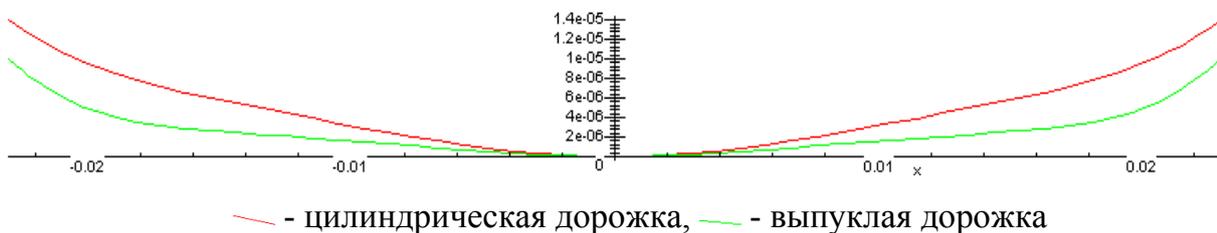


Рис. 1. Цилиндрическая и выпуклая дорожки качения.

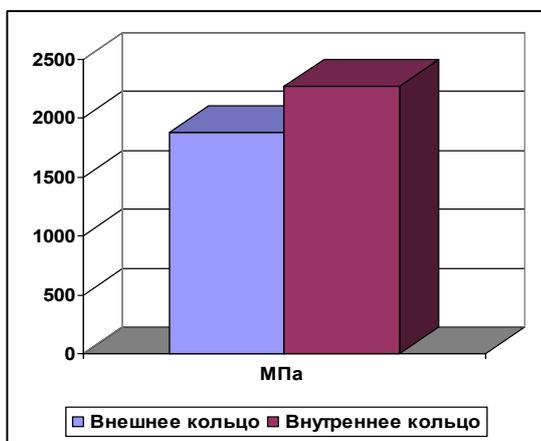


Рис.2. Величина максимальных контактных давлений на внешнем и внутреннем кольце.

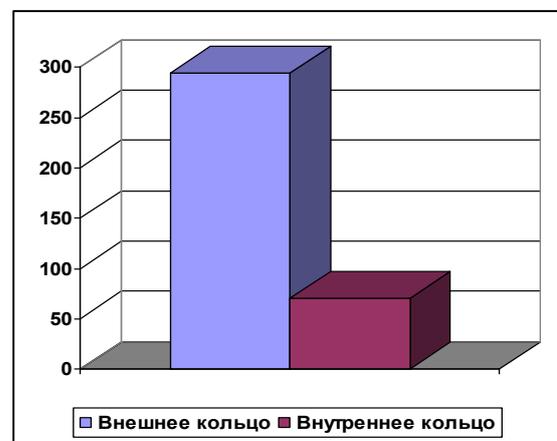


Рис.3. Количество «соударений» внешнего и внутреннего кольца с роликами в зоне нагружения за 50 оборотов внутреннего кольца.

Дальнейший анализ и контакты с ВНИИЖТ выявили, что количество отказов (выходов из строя) для внешних колец больше, чем для внутренних. Такой факт может быть обусловлен тем, что число «соударений» за единицу времени внешнего и внутреннего кольца с роликами в зоне нагружения существенно различаются (рис. 3).

Расчетная модель была перестроена для внешнего кольца. Результат оптимизации профиля боковой поверхности ролика показал, что оптимизированные профили для моделей с внутренним и внешним кольцом практически не отличаются (рис. 4). За основу выбрана модель для внешнего кольца.

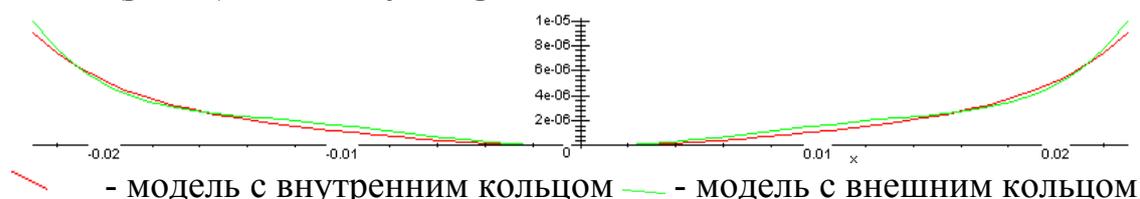


Рис. 4. Оптимизированные профили.

Использование критерия минимизации максимальных контактных напряжений влечет за собой максимизацию зоны контакта. При рассмотрении задачи контакта торцевой поверхности ролика и борта кольца в силу наличия трения скольжения на торцевой поверхности (в отличие от трения качения на боковой) такой результат не будет оптимальным.

Критерий может быть выбран на основе анализа энергии, затрачиваемой на трение в зоне контакта. Очевидно, что чем меньше энергия, затрачиваемая на трение в системе, тем меньше износ и, соответственно, выше надежность узла. Вводится понятие интенсивности работы сил трения в точке. Она равна интегралу от интенсивности силы трения по пути трения:

$$A^{iTp} = \int F^{iTp} dL = f \int \sigma_{конт} dL$$

В качестве критерия для оптимизации используется интеграл интенсивности работы силы трения по высоте внутренней поверхности борта кольца:

$$G = \int A^{iTp} dh.$$

Изучено влияние угла наклона боковой поверхности ролика и ответной поверхности колец. Оптимальный угол наклона с точки зрения минимизации интенсивности работы сил трения оказался меньше гостированного. □ При дальнейшем росте этого угла наблюдался устойчивый рост максимальных напряжений. Проведена оптимизация для ряда принципиальных моделей (рис. 5 – рис. 8):

- плоский торец и плоский бортик, варьируются величина скоса и угол конусности;
- плоский торец и выпуклый бортик, варьируется кривизна (выпуклость) внутренней поверхности борта кольца, высота точки касания;
- выпуклый торец и плоский бортик, варьируется кривизна (выпуклость) профильной фаски на торце ролика, высота точки касания;
- выпуклый торец и вогнутый бортик, варьируется кривизна (выпуклость) торца ролика, кривизна (вогнутость) внутренней поверхности борта кольца, высота точки касания.

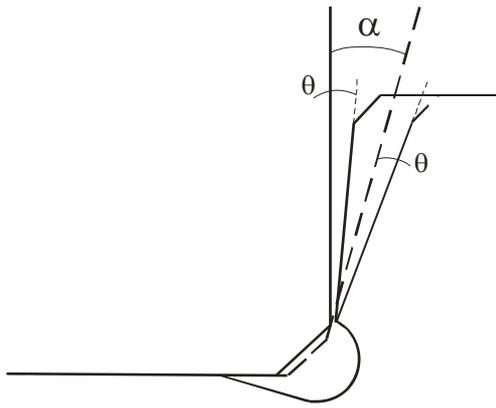


Рис.5. Плоский торец и плоский бортик.

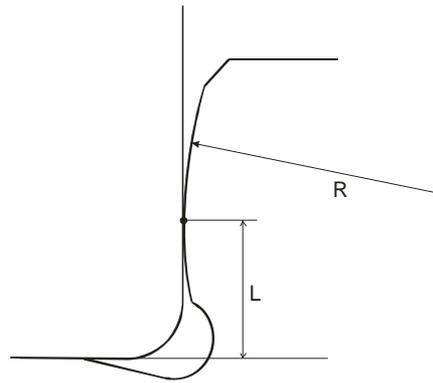


Рис.6. Плоский торец и выпуклый бортик.

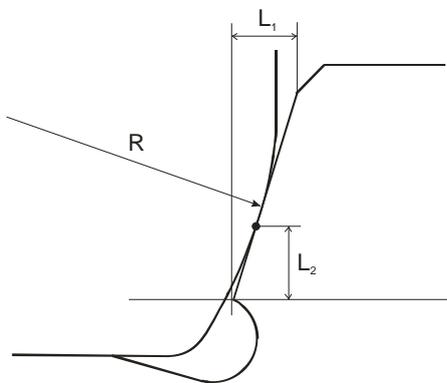


Рис.7. Выпуклый торец и плоский бортик.

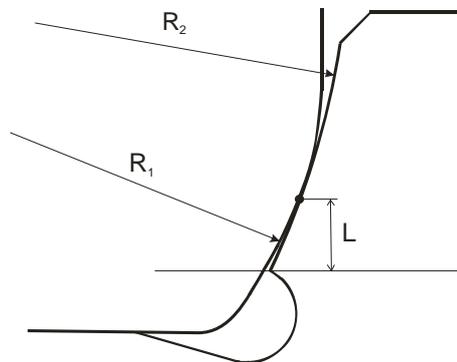


Рис.8. Выпуклый торец и вогнутый бортик.

Из технологических соображений выбрана модель с плоским торцом и выпуклым бортом. Высота линии центра дуги образующей боковой поверхности кольца практически определяет высоту точки контакта двух поверхностей в данном случае.

В результате данной работы решена контактная задача и проведена оптимизация образующих поверхности ролика и дорожки качения по критерию минимизации контактных напряжений. Найден критерий оптимизации торцевой поверхности ролика. Рассмотрены принципиальные модели зоны контакта, для каждой найден оптимальный вариант. Из соображений технологичности выбрана модель с плоским торцом и выпуклым бортом.

За счет перехода к более сложным поверхностям снижено максимальное контактное напряжение и максимальная интенсивность работы сил трения, что влечет увеличение срока службы и снижение материалоемкости. Результаты решения в такой постановке получены впервые. Новая модель по своим характеристикам превосходит аналоги и предназначена для промышленного применения.

Литература: 1. ГОСТ 25.504-82. Расчет и испытание на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. 2. Леликов О.П. Валы и опоры с подшипниками качения. Конструирование и расчет: Справочник. – М.: Машиностроение, 2006. – 640 с. 3. Tedric A. Harris, Michael N. Kotzalas Essential Concepts of Bearing Technology, Taylor & Francis Group, 2007.

**НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМ
КОЛЛЕКТИВНОГО ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Савченко Н.Ф., канд. техн. наук, **Сухов В.В.**, **Пахнюк Е.А.**,
Турищев О.Б. (г. Харьков, Украина)

Proved expedience of application and improvement of the systems collective rescue the light of modern tendencies of growth of passenger capacity and volumes by a carrying passengers air transport. As a variant, one of methods of the use of parachute as system of collective rescue is offered.

Коммерческое и туристическое использование самолетов и вертолетов как наиболее эффективного транспортного средства ограничивается, к сожалению, сравнительно большим риском совершения полетов, особенно значительном при малом опыте пилота – владельца транспортного средства или же при возникновении форс-мажорных ситуаций в полете (внезапные отказы двигателей, резкое ухудшение погодных условий, поломки жизненно важных изделий конструкции и другие непредвиденные случаи) [1-7].

Поэтому вопрос выбора систем жизнеобеспечения во время полетов является актуальным с того времени, когда грузо- и пассажироперевозка авиационным транспортом перестала быть прерогативой любителей-энтузиастов. При переводе этой деятельности на коммерческие рельсы перед владельцами появились неотложные вопросы - как уменьшить риски потери того или иного груза или летательного аппарата (ЛА). Первоначально в 20-30-ые годы XX ст. этого достигали за счет повышения мастерства пилотов, а также технических нововведений (например, изменяли на лучшие условия эксплуатации двигателей и их относительную мощность на единицу массы). Благодаря этому можно было перевозить большую массу, за счет части которой усиливались характеристики жесткости конструкции. Кроме того, улучшали показатели качества ЛА. Этому способствовало стремительное развитие аэродинамики, в частности, изготовление более качественных обтекаемых поверхностей.

Согласно данным сайта [4], количество аварий, вызванных некорректными действиями пилотов, в течение последних десятилетий почти не изменяется, что свидетельствует о достижении определенного среднего уровня их мастерства. Как видим, главное место занимают причины, связанные с механическим фактором. Это свидетельствует о необходимости уменьшить негативное влияние от технических повреждений. В случае, если этого сделать невозможно, самолет должен быть оборудован средствами спасания пассажиров, экипажа, или груза.

Со временем авиационная деятельность сформировалась в отдельный вид бизнеса, соответственно изменились и основные требования к ЛА. Главным заданием стало сочетание максимально возможной грузоподъемности (в пересчете на единицу общей массы) и минимальных расходов топлива. А вопрос безопасности полетов отошел на второй план. Однако тенденция к увеличению летательных аппаратов (как следствие роста грузоподъемности) не обошла и сегмент пассажироперевозки.

За полтора десятилетия выросло количество пассажиромест, а также объемы пассажироперевозок. Это произошло в результате процессов глобализации в мировой экономике и большей мобильности населения (особенно в развитых странах). Согласно прогнозу специалистов компании Airbus [5], с 2007-го до 2026 г. пассажиропоток ежегодно будет расти на 4,9%, а количество предложений (рейсов) – вдвое. Кроме того, эксперты утверждают, что количество коммерческих авиалайнеров в мире (пассажирских с количеством пассажиромест более 100) вырастет с 13284 (в 2006 г.) до 28534 (в 2026 г.). А пассажиропоток вырастет втрое – авиакомпании увеличат количество самолетов более чем в 2 раза [3].

Вышеназванные причины опять делают крайне актуальным вопрос безопасности полетов. Учитывая прогнозы относительно увеличения авиационного парка компаний и объемов пассажироперевозок, на статистику катастроф и погибших в них, а также на тенденцию к увеличению пассажироместимости современных авиалайнеров картина вырисовывается не очень привлекательная. Если не принять меры, направленные на повышение уровня безопасности полетов, человеческие потери также увеличатся втрое, а при росте вместимости – даже больше.

Условно разделив рейс на этапы - «взлет», «набор высоты», «горизонтальный полет», «снижение» и «посадка», получим статистику смертности на каждом из них. Оказывается, что наиболее опасным является «горизонтальный полет» (41,19% общего количества погибших в авиакатастрофах) и «снижение» (39,32%) [3].

Основные средства спасания направлены на нейтрализацию наиболее типичных причин катастроф:

- для факторов, связанных с ошибкой пилота, разработаны специальные программы-автопилоты для определенных критических ситуаций в полете и тренировочные программы. Компания «Airbus» на своем официальном сайте разместила рекомендательную информацию (как «себя вести» при возникновении на определенном этапе полета аварийной ситуации);
- естественные факторы нейтрализуются за счет использования специальных материалов (антимолниеносных, системы антиобледенения и тому подобное);
- человеческий фактор (саботаж, неправомерные действия пассажиров) нейтрализуется в предполетной стадии. Существуют также патенты на антитеррористические мероприятия, в частности наличие «скрытого» пассажира (например, в потайном помещении);
- противодействие механическим факторам экономически нецелесообразно, поскольку интеграция таких систем увеличивает массовые характеристики самолетов и усложняет производственный цикл.

Учитывая статистику катастроф на разных этапах полета и факторы, которые к ним приводят, можно увидеть актуальность исследования мероприятий, направленных на противодействие этим факторам. Однако, согласно анализа зарубежных источников, основными тенденциями развития систем спасе-

ния является внедрение превентивных мероприятий, таких как улучшение диспетчерской службы, технического мастерства пилотов (за счет тренировок), применения системы «автопилот», предполетному контролю. Так компания «Airbus» на своем официальном сайте разместила рекомендательные материалы для разных этапов полета, в которых даются указания относительно поведения как пилотов, так и пассажиров, при возникновении аварийных ситуаций [4,7]. Однако, они лишь указывают, каким образом реагировать при возникновении той или другой аварийной ситуации, а не направлены на нейтрализацию ее возможности.

Как видим, вопрос необходимости применения систем коллективного спасения пассажиров еще не приобрел актуальность среди зарубежных специалистов, что частично предопределено значительными расходами на разработку и внедрение таких систем. Однако, необходимость существования подобных систем безусловна, поскольку каждый раз после дежурной авиакатастрофы в обществе возрастает напряженность, предопределенная отношением авиакомпаний к безопасности полетов и пренебрежением ими ценностью человеческой жизни.

Следует заметить, что для уменьшения катастрофических последствий аварийного приземления (посадки) самолетов и вертолетов в настоящее время известно достаточно большое количество способов, использующих различные устройства типа парашютов, специальные приемы приземления, дополнительные двигатели. Тем не менее, проблема спасения экипажа и пассажиров достаточно остра. Например, существующие методы аварийного спасения самолета, как правило, не эффективны на малых высотах (30 ... 100 м), так как парашютные системы не обеспечивают надежное развертывание купола парашюта в пространстве за минимальное время (5 ... 30 с). Использование существующих парашютов ограничено также сложностью и малой площадью купольной системы, опасностью перехлеста строп и свертывания (гашения) купола. Это во всех случаях приводит к ухудшению аэродинамических характеристик самолета, созданию непрогнозируемых режимов приземления самолета, завершающегося катастрофическими последствиями.

С этой целью на основе анализа наиболее важных решений, разработанных для ликвидации авиационных аварий (например, патент США № 5810293 от 22.09. 1998 г., патент РФ № 2009081 и № 2056331 соответственно от 15.03. 1994 г. и 20.03. 1996 г., патент DE № 19854410 от 16.03. 2000 г.), предложен способ ликвидации аварий (патент Украины №49951), использование которого дает возможность осуществлять аварийное спасение самолета или вертолета как цельной, специально не разделяемой, конструкции путем повышения аэродинамического качества и быстродействия парашютов, минимизации их массы, повышения динамической устойчивости систем «летательный аппарат – парашют» как после возникновения, так и в процессе устранения аварии.

Для этого в фюзеляже самолета выполняется один или два технологических люка для размещения одного или нескольких парашютов (в зависимости от массы ЛА). Парашют в фюзеляже собран в виде жгута и по кромкам гибко (например, через отверстия в усиленных окантовкой кромках парашюта и

вспомогательные троса для крепления в зоне оперенья самолета) присоединен к тросам трособлочной системы, служащей для принудительного размещения парашюта в виде жгута после возникновения аварии (первый этап) над самолетом и обеспечения возможности перемещения купола после его раскрытия (второй и последующий этапы устранения аварии). Для повышения аэродинамических качеств купольной системы парашюта (путем изменения положения купола относительно поверхности самолета) используются система строп (сравнительно с известными системами существенно меньшей длины), соединенная с тросами, которые предварительно размещены в щелевидных технологических люках (от технологического люка с полотом парашюта до кромок крыла). Особенностью способа аварийного спасения является использование привода для регулирования длины трособлочной системы и возможности силового смещения купола относительно оси симметрии самолета.

Благодаря компактности, относительно малой массе (благодаря минимальной длине трос) и тому, что купол парашюта предварительно собран в виде жгута (с вакуумным или механическим креплением секций), его размещение в пространстве может осуществляться за минимальное время (несколько секунд), что позволяет использовать предложенный метод аварийного спасения и на малых высотах.

Важным обстоятельством, отличающим предложенную конструкцию парашюта и систему аварийного спасения самолета или вертолета от известных, можно считать и предусмотренную возможность при падении летательного аппарата, осуществлять целенаправленное управление смещением строп парашюта. Это может быть эффективно при ликвидации аварии типа «скольжение на крыло», «пикирование», для предотвращения или выхода из штопора.

Парашютная система при необходимости может быть снабжена механизмами ее принудительного размещения и фиксирования в пространстве, например, для того, чтобы предотвратить возможность осуществления террористического акта по типу техногенной катастрофы.

Проведенные предварительные технико-экономические исследования, а также результаты физико-ситуационного моделирования позволяют считать разработанный способ и систему аварийного спасения достаточно простым и надежным средством, использование которого возможно как с участием пилота, так и без него, в автоматическом режиме.

Стоимость парашюта и системы аварийного спасения, как показывают расчеты, не превысит 35 – 50 тыс. долларов и может корректироваться в зависимости от стоимости средств автоматизации управления процессом устранения аварии.

Литература: 1. Исследование области целесообразного применения системы коллективного спасения пассажиров и экипажей в экстремальных условиях / Л.Г. Акопов, А.М. Матвеев // Общероссийский научно-технический журнал «Полет», 2001. №9. – С. 11-14. 2. Моделирование нагружения и формообразования осесимметричного парашюта при раскрытии / В.И. Морозов, А.Т. Пономарев, Ф.Г. Герасимов, В.А. Андросенков // Общероссийский научно-технический журнал «Полет», 2007. №11. – С. 35-43. 3. <http://aviation-safety.net>. 4. <http://www.planeciashinfo.com/>. 5. <http://www.greencarcongrcss.com/aviation/index.html>. 6. Окупается ли спасение? / М.Г. Акопов, В.В. Андреевский, Ефанов В.В., Кузин В.И., Моро-

зов В.П. // Общероссийский научно-технический журнал «Полет», 2001. №12. – С. 52-55. 7. Пахнюк Є.А., Савченко М.Ф., Сухов В.В., Турішев О.Б. Дослідження доцільності застосування систем колективного життєзабезпечення пасажирських ЛА у світлі сучасних тенденцій розвитку авіаіндустрії // Інформаційні системи, механіка та керування. Науково-технічний збірник НТУ «КПІ», Вип. 1. – К., 2008. – С. 98-110.

УДК 378.147:330.341.1

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДГОТОВКИ КАДРІВ І ВИЗНАЧЕННЯ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНОСТІ

Воликов В. В., Савченко М.М. (м. Харків, Україна)

The competitiveness of enterprises in Ukraine needs subsequent improvement of methods in the in-plant of specialists, improvement of quality, their personal potential training.

Сьогодні в Україні для виходу економіки з кризи необхідне переосмислення ролі наукових і технологічних чинників в подоланні кризових явищ та створення ефективних механізмів розвитку і ефективного використання національного наукового і техніко-технологічного потенціалу.

В той же час конкурентоспроможність товарів та послуг потребує підвищення конкурентоспроможності об'єктів інтелектуальної власності (ОІВ), що визначається, впершу чергу, здатністю їх бути об'єктами ліцензійних угод та міжнародного технологічного обміну. На прикладі Харківської області можна дослідити динаміку змін у поданні та отриманні об'єктів інтелектуальної власності (рис. 1,а,б) як в Україні, так і за кордоном..

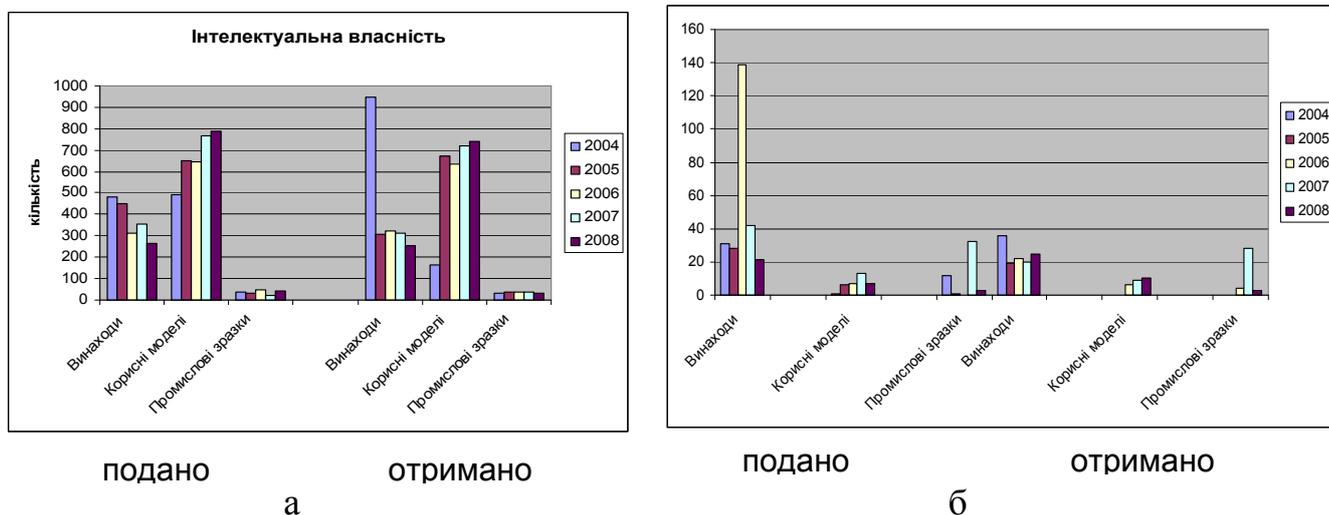


Рис.1. Кількість ОІВ (Харківська обл.): а – подання і отримання позитивних рішень в Україні; б – теж саме, але за кордоном.

З наведених даних можна визначити, що має місце відчутна різниця між кількістю та співвідношенням різних видів ОІВ (і визначальних для конкурентоспроможності підприємств) за станом в Україні і за кордоном.

В Україні (на прикладі Харківської обл.) характерним на протязі чотирьох років є зменшення кількості винаходів та стабільно мала кількість проми-

слових зразків. Позитивна динаміка тримається лише для корисних моделей.

За кордоном, ураховуючи більш складну, відносно кошовну та сувору процедуру підтвердження патентоспроможності українських ОІВ, кількість заявлених та підтверджених майже усіх об'єктів ОІВ (за винятком промислових зразків) у десять і більше разів за кількістю менші, ніж подані і отримані в Україні. Більш вагомими у структурі об'єктів є винаходи, хоча і їх кількість теж незначна, такі ж за пропорціями (за винятком 2006 р. – кращого за поданням і гіршого за результатами підтвердження). В той же час відносно високий рівень підтвердження патентної новизни за кількістю поданих і отриманих патентів таких об'єктів ОІВ, як корисні моделі та промислові зразки, свідчить про наявність інтелектуального потенціалу регіону. Загальна ж мала кількість подання заявок на отримання міжнародних патентів на об'єкти ОІВ (в першу чергу, винаходів) послаблює позицію українських виробників, конкурентоспроможність не лише їх товарів на міжнародному ринку, але й підприємств і держави у цілому, потребує більш збалансованої політики захисту вітчизняного пріоритету.

Тому входження країни у СОТ потребує покращення якості у сфері інтелектуальної праці, збільшення пріоритетів у захисті ОІВ, виявлення конкурентоспроможних об'єктів ОІВ та подальшого їх захисту.

Аналіз проведених досліджень [1-6] та цільова політика Державного департаменту інтелектуальної власності МОН України і Державного інституту інтелектуальної власності свідчать, що розвиток економіки стає не можливим без розроблення цілеспрямованої державної політики навчання і підвищення кваліфікації, яка повинна бути цілісною системою майбутнього використання інтелектуального ресурсу і включати етапи від підготовки молоді до перепідготовки освічених кадрів з метою ефективного їх подальшого використання на робочих місцях відповідного профілю.

Усунення основних проблем, що існують у сфері підготовки кадрів, зокрема підвищення ролі фахівців, в першу чергу розробників нової техніки та товарів, фахівців з правової охорони інтелектуальної власності (патентознавців, патентних повірених та інш.), які безпосередньо приймають участь у впровадженні інновацій у різних сферах сучасного виробництва товарів та послуг, потребує в інформаційному суспільстві, впровадження і дотримання таких принципів, які визначені у світі [1-6]:

1. креативність;
2. сталість розвитку (єдність і багатоукладність);
3. реалістичність;
4. раціональність;
5. духовність, моральність, громадянська позиція;
6. демократичність;
7. правомірність.

Кожен з цих принципів існує як система цінностей, яка впроваджена у виробництві, і впливає на внутрішні чинники підприємства, сприяє створенню інтелектуальних творчих груп.

Ефективна робота творчих груп потребує особливої уваги при створенні мікроклімату, наявності відповідних особистостей, які виконують наступні ро-

лі: аналітик, генератор ідей, ерудит, критик, розробник [1-4]. Також є важливим залучення до творчого процесу висококваліфікованих фахівців у якості:

- організатора – людина, яка здійснює аналіз ситуації і поставлених завдань, визначає цілі групової роботи, виділяє окремі етапи і формулює завдання окремим виконавцям;
- координатора – людина, яка здійснює аналіз змісту всіх індивідуальних дій і об'єднує їх у загальне ціле (працює в тісному контакті з організатором);
- контролера – людина, яка здійснює нагляд за правильністю реалізації діяльності, особливо за дотриманням послідовності і часу виконання роботи, а також ефективним використанням ресурсів;
- тренера – людина, яка орієнтована на передачу власного досвіду членам творчої групи (студентам, співробітникам та інш.) і здатна забезпечити процес адаптації та активної участі молоді у рольовій грі.

З урахуванням цих вимог мають формуватись на кожному підприємстві такі принципові положення, як системність, взаємоповага і командний стиль для усунення недоліків та покращення стану виробництва товарів та послуг, зниження їх собівартості, впровадження прогресивних технологій на постійній основі, зниження витрат енергоресурсів та використання їх альтернативної заміни. Як позитивний приклад закордонного та вітчизняного досвіду [1-8] можна навести використання вище наведених основних вимог для навчання студентів нетехнічних спеціальностей прийомам, які застосовуються у творчій діяльності. Так, всесвітньо відома теорія «ТРИЗ» (теорія вирішення винахідницьких задач), розроблена радянським винахідником і письменником-фантастом Г.С. Альтшуллером [1], та її удосконалення, що отримало подальший розвиток як метод ТЕР (технологія ефективних рішень) і досить поширено не тільки в Росії (корпорація «Сухой»), але й у світі [6]. Наприклад, у Європі компанія Siemens продовжує освоювати і впроваджувати інноваційну програму з використанням теорії вирішення винахідницьких задач. У США представники влади штату Коннектикут запроваджують її для підтримки малих і середніх підприємств на державному рівні. Досить поширені ці методи і у Великобританії та Південній Кореї. Особливістю творчих методик [1-4] є використання алгоритмів спеціальних методів виявлення протиріч та їх подолання. Для цього залучається банк фізичних ефектів, спеціальних прийомів, які послідовно досліджуються та впроваджуються фахівцями інноваційного розвитку (рис.).

Література: 1. Альтшуллер Г. С. Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач. – Новосибирск: Наука, 1986. – 209 с. 2. Кузнецов Ю.М. Теорія розв'язання творчих задач. – К.: ТОВ «ЗМОК» – ПП «ГНОЗИС», 2003. – 294 с. 3. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с. 4. Волюков В.В. Створення та використання інтелектуального потенціалу у вищих навчальних закладах України. Проблеми підготовки, перепідготовки та підвищення кваліфікації фахівців з інтелектуальної власності в Україні / Матеріали VIII Всеукраїнської науково-методичної конференції. – К.: Ін-т. інтелектуальної власності і права, 2008. – С. 45-48. 5. Перерва П.Г., Солощук М.М. Проблеми та перспективи перетворення інтелектуального потенціалу НТУ "ХПИ" в інноваційні траєкторії економіки знань. Проблеми підготовки фахівців з інтелектуальної власності в Україні / Матеріали VI Всеукраїнської науково-практичної конференції. – К.: Ін-т. інтелектуальної власності і права, 2006. – С. 157-163. 6. <http://www.trizland.ru>.

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СФЕРИЧЕСКОГО ВИБРОГАСИТЕЛЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ВЫСОТНОГО СООРУЖЕНИЯ

Андреев Ю.М., докт. техн. наук (г. Харьков, Украина)

The technique of calculation of parameters of a spherical damper of high-altitude facility called by wind and seismic effect is offered. A feature of dynamic calculation is sharing spatial beam model of elastic high-altitude facility and nonholonomic model of a vibration damper. The special system of computer algebra KiDyM is applied. It is explained and the effect of a decrease of a level of a spurious oscillation of defended object is demonstrated.

Введение. В большинстве работ, в которых решаются задачи неголономной динамики (например, [1-2]), уравнения движения выводятся ручным способом, а затем программируются и рассчитываются. В ряде работ автора [3-6] разработан и применен к исследованию неголономных систем векторно-матричный метод формирования уравнений движения на базе общего вариационного принципа механики, реализованный в специальной системе компьютерной алгебры КИДИМ. Традиционное для этой системы аналитическое описание механической голономной модели инерционными, диссипативными, упругими и силовыми элементами дополняется уравнениями линейных кинематических связей. Эти уравнения задаются в виде разрешенных относительно зависимых обобщенных скоростей формул от независимых обобщенных скоростей или псевдоскоростей. Система строит дифференциальные уравнения движения с исключением зависимых вариаций обобщенных координат по единому алгоритму в обобщенных или псевдоскоростях и ускорениях без использования неопределенных множителей Лагранжа, трехиндексных символов, энергии ускорений Аппеля, кинетической и потенциальной энергии, функции Рэля.

Постановка проблемы. Метод виброзащиты высотных упругоподатливых сооружений на основе применения гасителей с перекатывающимися в сферических выемках шаров предложен в работах Легезы В.П. [2, 7-8]. Однако, ни в одной из его работ не дано механического объяснения эффекту снижения уровня колебаний защищаемого объекта. Поэтому нет и методики расчета таких устройств. Кроме того, ввиду сложности динамического расчета колебаний упругого защищаемого объекта, происходящих совместно с перекатыванием шара гасителя, Легезой В.П. рассматриваются простые модели защищаемых систем. Это - твердое тело, совершающее поступательное [2] или вращательное [7] движение. Возможности, реализованные в системе КИДИМ, позволяют решить задачу о пространственных колебаниях высотного объекта совместно с перекатыванием шара в сферической выемке виброгасителя, рассматриваемого как неголономная система.

Механическая модель. Для выяснения эффекта гашения рассмотрена задача о колебаниях ферменной мачты, на которой установлен шаровой гаситель колебаний в верхнем сечении (рис. 1). Параметры ферменной конструкции взяты из пособия ([9], стр. 128). Считается, что стержни соединены шарнирами, к которым приводятся массы стержней. Общее число узлов, считая и нижние, за-

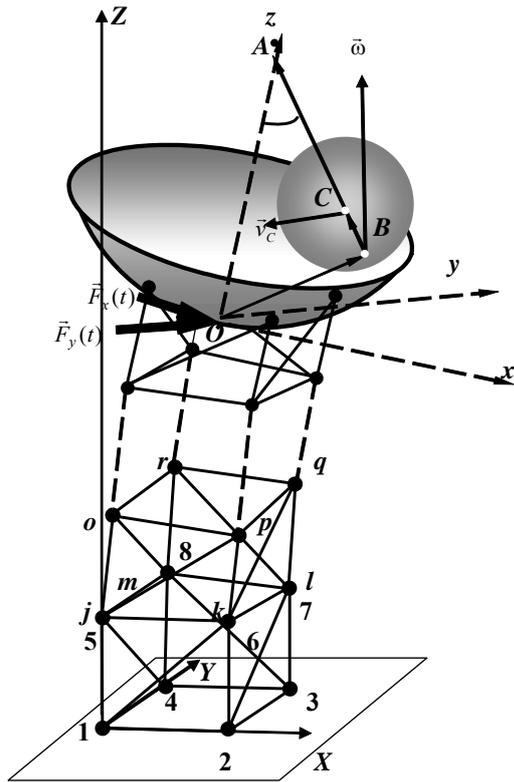


Рис. 1. Модель мачты со сферическим гасителем.

площади поперечного сечения раскосов и поясов ($F_r=0,004\text{м}^2$, $F_p=0,01\text{м}^2$). Шар и чаша считаются однородными и недеформируемыми. Стержни фермы подвергаются растяжению-сжатию, жесткости их вычисляются по формулам $C_r = EF_r$, $C_p = EF_p$, (модуль упругости материала $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$).

Тогда:

- координаты точек 1, 2, 3, 4 основания мачты в неподвижной системе координат и точек D, E, F, H крепления чаши к мачте в СК чаши ($a = L_p/2$)

$$x_1 = x_4 = x_D = x_H = -a; x_2 = x_3 = x_E = x_F = a;$$

$$y_1 = y_2 = y_D = y_E = -a; y_3 = y_4 = y_F = y_H = a;$$

- деформации упругих элементов через $x_i, x_j, y_i, y_j, z_i, z_j$ – координаты концов стержней и L – их длину

$$\Delta_{i,j} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2} - L;$$

- диссипативные силы считались линейными от скоростей и приложенными к узлам мачты с коэффициентами μ_i , пропорциональными массам $\mu_i = 5m_i$.

Малые свободные колебания. Проведены расчеты малых линейных колебаний указанной модели, так как допустимые отклонения верхних частей высотных объектов согласно нормативным документам строительной отрасли не должны превышать 1% высоты. Рассмотрим отдельно мачту и виброгаситель. Виброгаситель можно представить колебательной системой с шестью степенями свободы для чаши, одной степенью свободы при плоском качении шара и

крепленные, $N=4(n+1)$, n – число секций в мачте. В качестве обобщенных координат приняты декартовы координаты шарниров ($x_5, y_5, z_5 \dots, x_N, y_N, z_N$), координаты центра масс сферической чаши (x_g, y_g, z_g), который располагается в центре верхней грани мачты, углы Эйлера-Крылова (α, β, γ), задающие ориентацию чаши в пространстве. В качестве псевдокоординат приняты углы поворота шара вокруг собственных осей, параллельных неподвижным осям $\{\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z\}$. Этим углам соответствуют псевдоскорости $\{\omega_x, \omega_y, \omega_z\}$ – проекции его угловой скорости на эти оси.

Если L_r – длина раскоса, L_p – длина пояса (стойки), причем $L_r = L_p\sqrt{2}$ (здесь и далее индекс p означает «пояс» или «стойка», а r – «раскос»); то их массы $m_r = \rho L_r F_r$, $m_p = \rho L_p F_p$, где ρ – плотность материала ($\rho=7800\text{кг/м}^3$), F_r, F_p –

двумя – при пространственном. При плоском качении шара будет $\omega_z=0$, $z_C=r$, и уравнение неголономности $\vec{v}_C + \vec{\omega} \times \vec{CB} = 0$ интегрируется и дает голономную связь $x_C = r\varphi_y$, $y_C = -r\varphi_x$. Поэтому уравнения малых колебаний шара около положения устойчивого равновесия с учетом восстанавливающей силы – составляющей силы тяжести шара и инерционности в сложном движении шара имеют вид $\ddot{\beta} + k^2\beta = 0$, где $k^2 = \frac{g}{1,4(R-r)} = \frac{7}{R-r}$, R, r – радиусы чаши и шара. Так как

знаменатель этого выражения для реальной конструкции не может быть малым (иначе будет мала масса шара и влияние виброгасителя будет ничтожным), то перекаатывающийся шар в сферической чаше представляет собой низкочастотную колебательную систему со значением собственной частоты порядка единиц rad/c .

Установка виброгасителя, имеющего свою собственную частоту, на мачту, приводит к тому, что спектральные характеристики такой системы отличаются от исходных – мачты и шара, причем наибольшие изменения происходят с собственными частотами, наиболее близкими к собственной частоте шара. Кроме того, масса самой чаши на упругой мачте представляет собой обратный маятник и также изменит спектр системы мачта-виброгаситель. Для расчета свободных малых колебаний формулы для деформаций упругих стержней фермы $\Delta_{i,j}$ линеаризуются обычным образом. Спектр собственных частот мачты содержит в области единиц rad/c только самые первые частоты, поэтому включение виброгасителя в систему изменит самые низкие собственные частоты защищаемого объекта. Поставим задачу подавить первую собственную частоту мачты.

На рис. 2 приведены зависимости первой собственной частоты мачты от ее высоты (числа секций N , справа) и ширины L_p (соответственно, слева), позволяющие выбрать приемлемый размер стержней мачты. Например, для $N=10$ и $L_p=5m$ получим $k=6,31383rad/c$, а, значит, при $R=L_p$ получим $r=4,824m$. Можно говорить о том, что влияние такого виброгасителя на мачту обусловлено эффектом антивибратора.

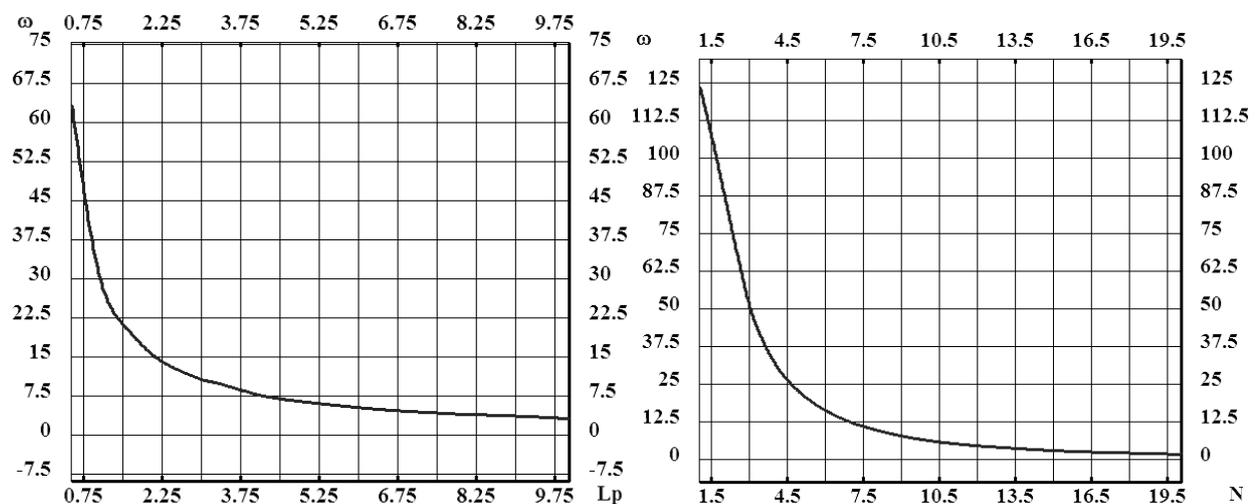


Рис. 2. Зависимости первой собственной частоты (rad/c) мачты от ширины (m , слева) и высоты (числа секций, справа).

Расчет свободных колебаний мачты без виброгасителя дает для $N=10$ и $L_p=5м$ собственные частоты, первые пять значений которых приведены в таблице в левых столбцах. Для того, чтобы учесть влияние на спектр частот системы мачта-виброгаситель колеблющейся чаши были рассчитаны собственные частоты мачты с чашей без шара, которые приведены в таблице в средних столбцах. Масса чаши подобрана таким образом, чтобы первая собственная частота изменилась незначительно. В правых столбцах таблицы приведены значения собственных частот мачты вместе с виброгасителем, настроенным на частоту $6,30194rad/c$. Видно, что введение в систему такого виброгасителя изменяет низшие собственные частоты системы, образуя две частоты - ниже резонансной мачты ($0,79rad/c$ и $2,72rad/c$) и одну - выше ($12,25rad/c$).

Собственные частоты малых колебаний мачты и виброгасителя

№	Мачта без виброгасителя		Мачта с чашей		Мачта с чашей и шаром	
	рад/с	Гц	Рад/с	Гц	рад/с	Гц
1	6.31383	1.00488	6.30194	1.00299	0.795983	0.126685
2	8.66540	1.37914	6.30195	1.00299	0.795983	0.126685
3	8.66540	1.37914	35.73801	5.68788	2.716164	0.432291
4	25.70706	4.09141	36.57651	5.82133	2.716164	0.432291
5	35.19733	5.60183	36.57701	5.82141	12.253956	1.950278

Расчетная проверка синтезированного виброгасителя. Проверка результата применения виброгасителя с указанными характеристиками проведена непосредственным расчетом законов движения точек мачты при силовом (ветровом) и кинематическом (сейсмическом) возбуждении ее колебаний. Силовое возбуждение прикладывалось к нижней точке чаши и имело две составляющих в горизонтальной плоскости [2] $F_x=F_0*\sin(\omega t)$, $F_y=0.4*F_0*\cos(\omega t)$, где $F_0=7*10^4H$; $\omega=6.31rad/c$. На рис. 3 слева приведено расчетное движение нижней точки чаши в проекции на горизонтальную плоскость без виброгасителя, а справа – с виброгасителем.

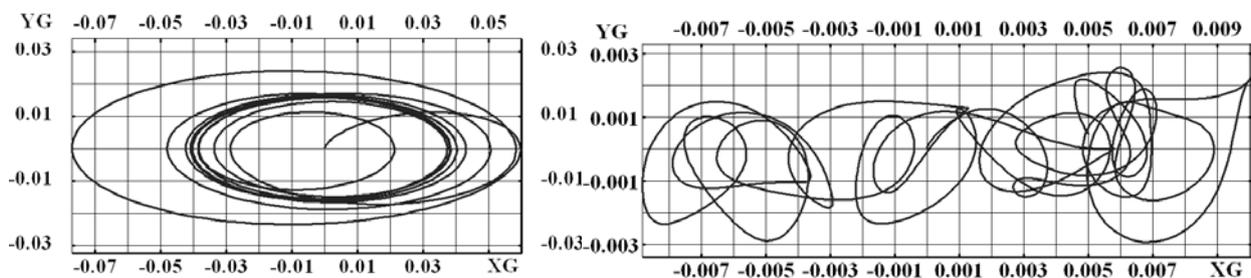


Рис. 3. Траектории движения нижней точки чаши: без виброгасителя (слева) и с виброгасителем (справа).

Наблюдается значительное снижение размаха колебаний (с $13,5см$ до $1,9см$ по оси Y и с $4,8см$ до $0,55см$ по оси X) и заметно пропадание в законе движения мачты с виброгасителем гармоника с частотой $\omega=6.31rad/c$ (которой соответствует регулярное колебание по обеим осям – рис. 3 слева) - она полностью подавлена виброгасителем. Движение становится более хаотическим, так

как оно является суперпозицией малых движений с некрратными собственными частотами колебаний.

Сейсмическое воздействие задавалось путем начального смещения вдоль оси X на 50см точек крепления мачты на фундаменте. Для параметров модели $Lp=5м$, $R=5м$, $r=4м$, $N=5$ установлено, что, из-за несимметрии мачты вдоль оси Z , возникают пространственные колебания даже, несмотря на то, что начальное смещение почвы задавалось вдоль оси X , т.е. в вертикальной плоскости XZ . Это приводит к неплоскому качению шара виброгасителя. В связи с этим проявляется неголономная связь, что требует ее учета. На рис. 4 изображены 2 проекции траектории движения точки касания шара – вид сбоку (рис. 4, слева) и сверху (рис. 4, справа). Вначале имеет место хаотическое движение шара, затем оно становится регулярным.

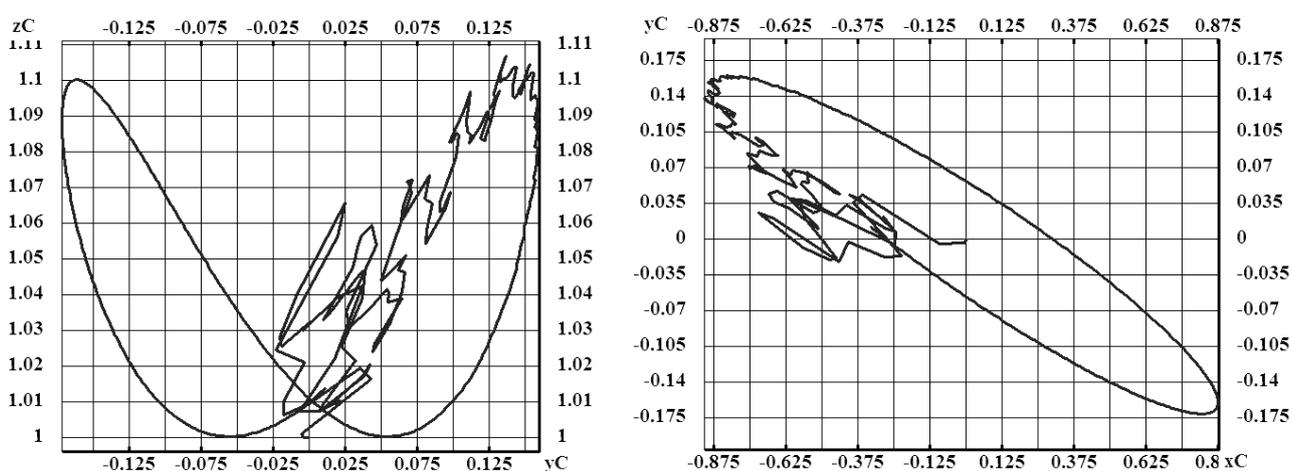


Рис. 4. Проекция траектории центра масс шара при сейсмическом воздействии: слева – вид сбоку, справа - вид сверху.

Выводы. Приведенный пример расчета сферического виброгасителя на основе свободных малых колебаний демонстрирует эффект гашения паразитных колебаний высотной мачты. Адекватность результатов подтверждается прямыми динамическими расчетами неголономной пространственной упругой модели мачта-виброгаситель.

Литература: 1. Антонюк Е.Я. К теории движения сочлененного многозвенного автопоезда. / Е.Я. Антонюк, В.М. Матиясевиц // Прикл. механика. – 2002. – Т. 38, №7. – С. 138-144. 2. Легеза В.П. О качении тяжелого шара в сферической выемке несущего тела, совершающего поступательные перемещения в пространстве / В. П. Легеза // Прикл. механика. – 2002. – Т. 38, №6. – С. 135-142. 3. Андреев Ю. М. Компьютерное построение дифференциальных уравнений движения неголономных систем / Ю. М. Андреев, Л. И. Штейнвольф // Динамика и прочность машин: респ. междувед. науч.-техн. сб. – Харьков : ХПИ, 1993. – Вып. 54. – С. 93-98. 4. Андреев Ю. М. Компьютерное моделирование неголономных систем твердых тел на основе принципа Даламбера-Лагранжа / Ю.М. Андреев, О.К. Морачковский // Прикл. механика. – 2006. – Т. 42, №9. – С. 106-115. 5. Андреев Ю. М. Новая система компьютерной алгебры для исследования колебаний структурно-сложных голономных и неголономных систем твердых тел / Ю.М. Андреев, О.К. Морачковский // Надежность и долговечность машин и сооружений: междунар. науч.-техн. сбор. НАН Украины. – К.: ИПП им. Писаренко Г.С., Ассоциация «Надежность машин и сооружений», 2006. – Вып. 26. – С. 11-18. 6. Андреев Ю. М. Разработка САПР динамики машин на основе специальной системы

компьютерной алгебры / Ю. М. Андреев, О. К. Морачковский // Физические и компьютерные технологии: 11-я Междунар. конф.: Труды. - Харьков : ХНПК «ФЭД», 2005. - С. 252-264. 7. Легеза В. П. Вынужденные колебания перевернутого маятника с тяжелым шаром в его сферической выемке под действием периодической силы / В. П. Легеза // Проблемы управления и информатики. - 2003. - №1. - С. 25-33. 8. Легеза В. П. Новий метод віброзахисту висотних гнучких споруд на основі застосування коткових гасників / В. П. Легеза // Машинознавство. - 2003. - №5 (71). - С. 34-39. 9. Агапов В. П. Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости пространственных тонкостенных подкрепленных конструкций : учебное пособие / В. П. Агапов. - М.: Изд-во АСВ, 2000. - 152 с.

УДК (656.2. 621.822.6) 002.237

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ СКЛОПОЛІАМІДНИХ СЕПАРАТОРІВ РОЛИКОВИХ ПІДШИПНИКІВ

Гайдамака А. В., канд. техн. наук, Алефіренко В. Ю. (м. Харків, Україна)

In this work the basic results of research of capacity are given a “separator is a basing ring” of bearings which allowed to decrease a friction and promote wear-proofness of details.

The method of model researches is developed, the criterion of optimization, experimental factors and research plan, is chosen, the interpolation formula of wear of glasspolyamide separator is built for the designed range of external of the wheeled pair of carriages environments.

В цій роботі подано основні результати дослідження працездатності трибоспряження “сепаратор – базуюче кільце” підшипників, які дозволили зменшити тертя і підвищити зносостійкість деталей.

Підвищений знос сепаратора змінює кінематику деталей підшипника і може привести до руйнування вузла. Отже підвищення зносостійкості, наприклад склополіамідного сепаратора роликотпідшипників колісних пар вагонів є актуальною проблемою безпеки руху залізничного транспорту.

Моделі експериментальні дослідження тертя та зношування натурального склополіамідного сепаратора з базуючим зовнішнім кільцем циліндричного роликотпідшипника типу 2726 проводились на пристрої оригінальної конструкції [1], що показаний на рис.1.



Рис. 1. Пристрій для модельних випробувань трибоспряження “сепаратор – базуюче” кільце підшипників.

Пристрій для модельних випробувань трибоспряження “сепаратор – базуюче” кільце підшипників дозволяє прискорити дослідження зношування сепаратора без впливу тіл кочення і внутрішнього кільця.

Розроблена методика модельних досліджень, вибрано критерій оптимізації, дослідні фактори та план дослідження, побудована інтерполяційна фо-

формула зношування склополіамідного сепаратора для діапазону який моделює умови експлуатації колісних пар вагонів [2]. Регресійна модель зношування склополіамідного сепаратора має вигляд:

$$y = 43,3 + 5,1x_1 + 6,2x_2 - 3,9x_3 + 0,8x_{12} - 0,5x_{13} - 0,6x_{23} - 0,9x_{123} \quad (1)$$

Виконана статистична обробка результатів дослідження за відтворюваністю експериментів, значимістю коефіцієнтів регресії, адекватності рівняння регресії.

Аналіз отриманого рівняння регресії (1) показав, що сила впливу факторів навантаження і швидкості ковзання приблизно однакова, а вплив мастилоутримуючих канавок майже у півтори рази слабкіший. Ефект взаємодії факторів приблизно на порядок менший. Доведено, що для дослідного діапазону факторів збільшення числа мастилоутримуючих канавок на базуючих поверхнях тертя склополіамідного сепаратора зменшує його знос.

Методом стрімкого сходження на прикладі трибоспряження “сепаратор – базуюче” кільце роликотідшипника типу 2726 визначено оптимальне число мастилоутримуючих канавок на поверхнях тертя склополіамідного сепаратора.

Порівняльні температурні випробування (рис.2) трибоспряжень “сепаратор – базуюче” кільце з різною кількістю мастилоутримуючих канавок підтверджують оптимальні результати досліджень зносостійкості склополіамідних сепараторів.

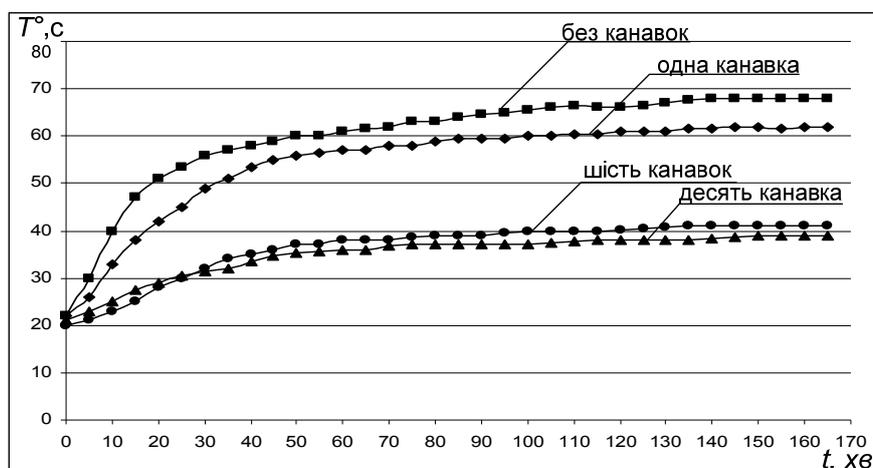


Рис. 2. Залежність температури контактної зони сепаратора з базуючим кільцем підшипника від терміну роботи і числа мастилоутримуючих канавок.

Таким чином, розроблений метод дослідження працездатності трибоспряження “сепаратор – базуюче” кільце може бути використаний для поліпшення умов роботи будь – яких підшипників кочення: великогабаритних і малих, тихохідних і швидкісних, кулькових і роликкових.

Література: 1. Гайдамака А.В., Музикін Ю.Д., Алефіренко В.Ю., Наумов А.І. Про підготовчій етап планування експерименту для вирішення задачі зменшення зносу сепаратора з деталями підшипника // Зб. наук. праць. –УкрДАЗТ, 2009. –Вип.108. –с.88-93. 2. А. В. Гайдамака, В. Ю. Алефіренко. Рівняння регресії зношування кілець склополіамідного сепаратора циліндричних роликотідшипників та його інтерпретація.// Зб. наук. праць. – УкрДАЗТ, 2009. –Вип.110. –с.44-47.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРООПОР ПЕРЕДВИЖНОЙ КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ НД-24/120

Гапонов В.С., докт. техн. наук, Музыкин Ю.Д., канд. техн. наук,
Столбовой А.С., канд. техн. Наук (г. Харьков, Украина)

In activity the new method of planning (glide) of experiment is submitted (shown), which one is founded on methods, known in mathematical statistics, essentially reaming their capabilities and practically not augmenting a scope of testing.

Наиболее объективно характеристики динамических систем могут быть получены при экспериментальных исследованиях, когда на контролируемый параметр влияют как управляемые, так и неуправляемые факторы. Для экспериментального описания динамических процессов наиболее эффективным является использование ротатабельного центрального композиционного плана (РЦКП), который позволяет получить изучаемую функцию отклика в виде полинома второго порядка, соответствующего случаю, когда исследуемая модель существенно нелинейна [1,2].

Опыт использования данного плана показывает, что наиболее полным в условиях оптимальных затрат на проведение испытаний, является трехфакторный эксперимент на трех уровнях. Однако три уровня не позволяют построить однопараметрические зависимости, которые нужны для изучения физики исследуемого процесса. Для этого желательно планировать эксперимент на пяти уровнях, за счет использования модифицированного ротатабельного центрального композиционного плана (МРЦКП), который, не увеличивая существенно объем испытаний, значительно расширяет объем полученной информации.

Так как исследуемая модель существенно нелинейна, функция отклика может быть представлена в виде полинома второго порядка.

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i,j=1}^k b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2,$$

где b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} - коэффициенты при переменных; X_i, X_j - переменные в кодированной форме, связанные с их натуральным значением.

План РЦКП [3, 4], основу которого составляет «ядро», представляющее полный факторный эксперимент (ПФЭ), к которому добавляются несколько специально организованных «звездных» точек, может быть представлен координатами точек в кодированном виде:

$$\begin{aligned} &1(-1-1-1); 2(+1-1-1); 3(-1+1-1); 4(+1+1-1); 5(-1-1+1); \\ &6(+1-1+1); 7(-1+1+1); 8(+1+1+1); 9(-\alpha 00); 10(\alpha 00); \\ &11(0-\alpha 0); 12(0+\alpha 0); 13(00-\alpha); 14(00+\alpha); 15...20(000). \end{aligned}$$

Использование РЦКП позволяет при помощи полученной модели описывать поверхность отклика с одинаковой точностью по всем направлениям. При этом остаточные дисперсии на одинаковых расстояниях от центра плана являются равными и наименьшими из возможных.

Сохраняя принцип композиционности, к матрице РЦКП добавляется еще 6 точек, которые лежат на пересечении осей переменных параметров с плоско-

стями куба, описывающими план ПФЭ. Такой план называется модифицированным ротатабельным центральным композиционным планом (МРЦКП). Обладая всеми достоинствами предыдущего плана, за счет незначительного увеличения экспериментальных точек, МРЦКП существенно увеличивает информативность полученных результатов и позволяет расширить перечень решаемых задач.

На рис. 1 представлена матрица МРЦКП при числе переменных факторов равном трем, которая последовательно включает в себя ПФЭ, РЦКП и дополняет их характерными точками, соответствующими линейной модели исследуемого процесса.

Координаты дополнительных точек в кодированном виде:

21(-1 0 0); 22(+1 0 0); 23(0 -1 0); 24(0 +1 0); 25(0 0 -1); 26(0 0 +1).

По найденным пяти точкам вдоль каждого параметра строят графические однопараметрические зависимости при двух других фиксированных параметрах, соответствующих точке центра плана.

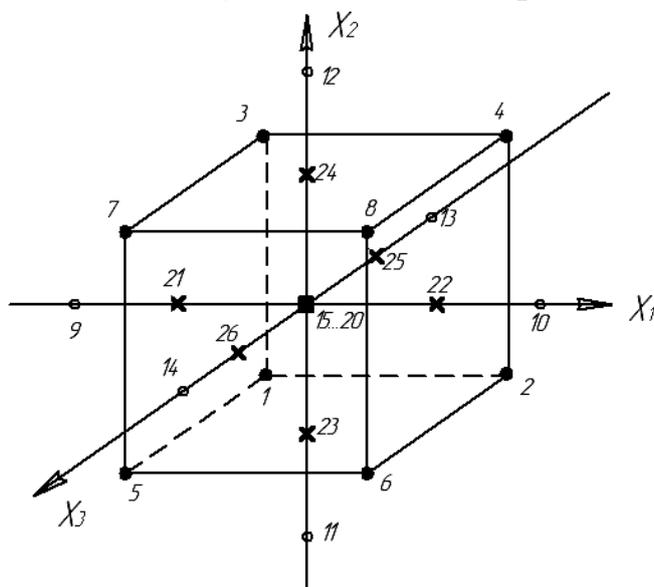


Рис. 1 Трехфакторный модифицированный ротатабельный центральный композиционный план
 ● - ядро плана; ○ - звездные точки; ■ - центр плана;
 × - дополнительные точки

План МРЦКП был использован при экспериментальном исследовании виброопор с управляемым с управляемым изменением квазиулевого жесткости для шумозащиты передвижной компрессорной станции НД-24/120.

Основными источниками воздушного шума компрессорной станции являются корпуса комплектующих изделий и корпус звукозащитного кожуха, излучающих шум вследствие передачи на них через опорные связи

механических колебаний от их источников. Эффективным способом снижения уровня акустического поля является разделение источника и излучателя вибраций – разделение виброопорами рамы с агрегатами компрессорной станции и рамы, на которой закреплен звукозащитный кожух. Виброизоляция тем эффективнее, чем ниже собственная частота виброопоры.

Учитывая особенности конструкции передвижных компрессорных станций, применение активных виброизолирующих систем технико-экономически не обосновано и является рациональным разработка виброопор пассивной виброизоляции с квазиулевого жесткостью. Эти виброопоры обеспечивают при высокой несущей способности малую динамическую жесткость и, следовательно, сколь угодно малую (квазиулевого) собственную частоту.

Для создания данных виброопор необходимо описать функцию изменения амплитуды колебаний упругой системы, которая базируется на результатах эксперимента, полученного для трех независимых переменных факторов.

$$y = f(X_1, X_2, X_3),$$

где X_1 - жесткость муфты с торообразной оболочкой; X_2 - момент инерции компрессора высокого давления; X_3 - момент инерции компрессора низкого давления.

Пределы варьирования независимых переменных определены исходя из реальных возможностей их изменения и разрешающей способности метода измерения:

$$X_1 = (1,5 \cdot 10^6 \dots 1,7 \cdot 10^6) \text{ кг} \cdot \text{см};$$

$$X_2 = (0,9 \dots 1,1) \text{ кг} \cdot \text{см} \cdot \text{сек}^2;$$

$$X_3 = (0,9 \dots 1,1) \text{ кг} \cdot \text{см} \cdot \text{сек}^2.$$

Так как исследуемая модель существенно нелинейна, функция отклика может быть представлена в виде полинома второго порядка.

Число уровней варьирования каждого фактора составляет пять.

Верхний уровень	+1	X_i^B
Нижний уровень	-1	X_i^H
Основной уровень	0	$X_i^0 = \frac{X_i^B + X_i^H}{2}$
Шаг варьирования	Δ	$\Delta X_i = \frac{X_i^B - X_i^H}{2}$
Звездные точки	$+\alpha X_i$	$X_i^0 + \alpha \Delta X_i$
	$-\alpha X_i$	$X_i^0 - \alpha \Delta X_i$

Представим эти уровни в явном виде

$X_1^B = 1,7 \cdot 10^6$	$X_2^B = 1,1$	$X_3^B = 1,1$
$X_1^H = 1,5 \cdot 10^6$	$X_2^H = 0,9$	$X_3^H = 0,9$
$X_1^0 = 1,6 \cdot 10^6$	$X_2^0 = 1$	$X_3^0 = 1$
$\Delta X_1 = 0,1 \cdot 10^6$	$\Delta X_2 = 0,1$	$\Delta X_3 = 0,1$
$\alpha X_1 = 1,768$	$\alpha X_2 = 1,168$	$\alpha X_3 = 1,168$
$-\alpha X_1 = 1,432$	$-\alpha X_2 = 0,832$	$-\alpha X_3 = 0,832$

С учетом принятых обозначений матрица планирования эксперимента МРЦКП может быть представлена 26 точками, определяющими условия испытаний в соответствии с рис. 1.

Предложенная модель МРЦКП позволяет экспериментально описать работу сложной динамической системы компрессорной станции НД-24/120 существенно расширив информативность полученных результатов за счет возможности получения однопараметрических зависимостей изменения амплитуды колебаний упругой системы в зависимости от эксплуатационных параметров. Пред-

ставленный план проведения испытаний обеспечивает получение наиболее высоких технико-экономических показателей экспериментальных исследований.

Литература: 1. Адлер Ю.И., Маркова Е.В., Граловский Ю.В. «Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий», М., «Наука», 1971. 2. Асатурян В.И. «Теория планирования эксперимента», М., «Радио и связь», 1983. 3. Дисонсон Н., Лион Ф. «Статистика и планирование эксперимента в технике», М., Изд-во «Мир», 1981. 4. Гутер Р.С., Овчинский Б.В. «Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта», М., Изд-во «Наука», 1970.

УДК 621.822.5

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ОПОРНЫХ УЗЛОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОДПЯТНИКОВ

Гапонов В.С., докт. техн. наук, Столбовой А.С., канд. техн. наук,
Музыкин Ю.Д., канд. техн. наук, Свиргун О.А., канд. техн. наук
(г. Харьков, Украина)

The questions of a choice optimum deviations and arrangement of basic units of working surfaces of axial bearings of sliding are considered.

Конструкции упорных гидродинамических подшипников, предназначенных для восприятия осевых нагрузок F_A , определяются условиями их работы и технологическими возможностями. На рис. 1 показана конструкция упорного подшипника скольжения с подпятником, имеющим самоустанавливающиеся подвижные кольцевые секторы и плоскую пяту.

Плоская опорная поверхность подпятника наклоняется во время работы с образованием сужающегося зазора за счет некоторого смещения точки опоры в направлении движения. Надежность работы рассматриваемых подшипников

определяется минимальной толщиной смазочного слоя h_B , разделяющего трущиеся поверхности, максимальным давлением и температурой в рабочей зоне. Рост температуры, в свою очередь, зависит от потерь на трение и расходов смазывающей жидкости.

Гидродинамический расчет упорных подшипников основывается на безразмерных коэффициентах нагруженности C_F , сопротивления вращению C_T , расхода смазывающей жидкости через внешнюю кромку C_{Qp} и среднего расхода по рабочей поверхности C_{Qm} .

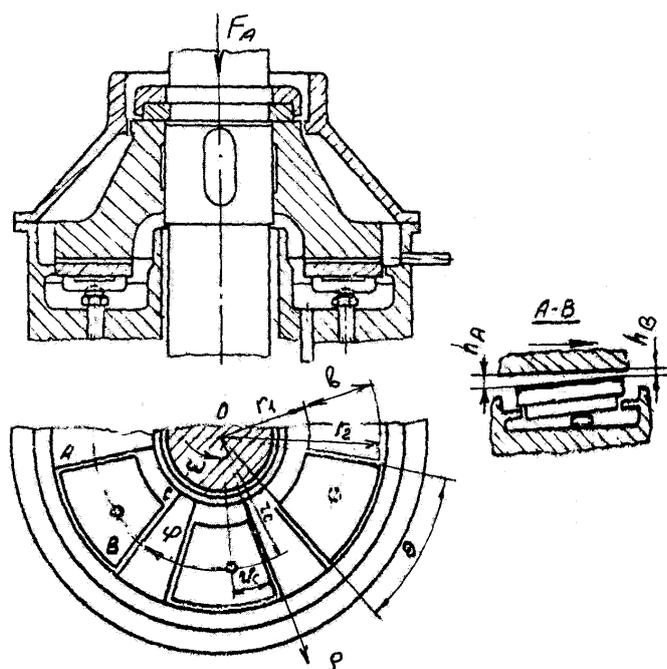


Рис. 1. Схема упорного гидродинамического подшипника.

Коэффициенты, полученные на основе решений уравнений Рейнольдса с инерционными добавками для высокоскоростных подшипников [1], приведены в работе [2] для подпятников с центральными углами кольцевых секторов $\theta = 20 - 60^\circ$ и соотношения радиусов. $r_2 / r_1 = 1,7 - 3$.

Минимальная толщина смазочного слоя h_B , разделяющего трущиеся поверхности, при выбранных из конструктивных соображений радиусах r_1, r_2 и угле θ определяется по формуле [3]

$$h_B = \sqrt{\frac{\mu \omega \theta z r_1^4}{F_A} C_F},$$

где μ - динамический коэффициент вязкости масла, ω - угловая скорость пяты, z - число кольцевых секторов. Из приведенной формулы видно, что одним из условий повышения надежности работы упорного подшипника является выбор максимального коэффициента нагруженности C_F , который зависит от уклонов рабочей поверхности, определяемых положением точки опоры, и параметра быстроходности, характеризуемого числом Рейнольдса

$$Re = \frac{\gamma \omega h_B^2}{\mu},$$

где γ - плотность масла.

Положение плоской поверхности упорного сектора определяется тремя точками A, B и C , которые расположены соответственно на расстояниях h_A, h_B и h_C от плоскости пяты. Кромка сектора AC является выходной кромкой рабочего участка. Уклоны конфузорного участка в направлении движения и по радиусу определяются соотношениями:

$$\alpha = \frac{h_A - h_B}{h_B}, \quad \beta = \frac{h_C - h_B}{h_B}.$$

Из теоретических основ гидродинамики опор скольжения [1] известно, что максимальная несущая способность для плоской пластины бесконечной ширины будет при $\alpha = 1,19$, а минимальный коэффициент трения будет при $\alpha = 1,53$. Исходя из этих данных, при исследовании влияния радиального уклона принималось $\alpha = 1,5$.

На рис. 2 представлены результаты расчетов коэффициентов нагруженно-

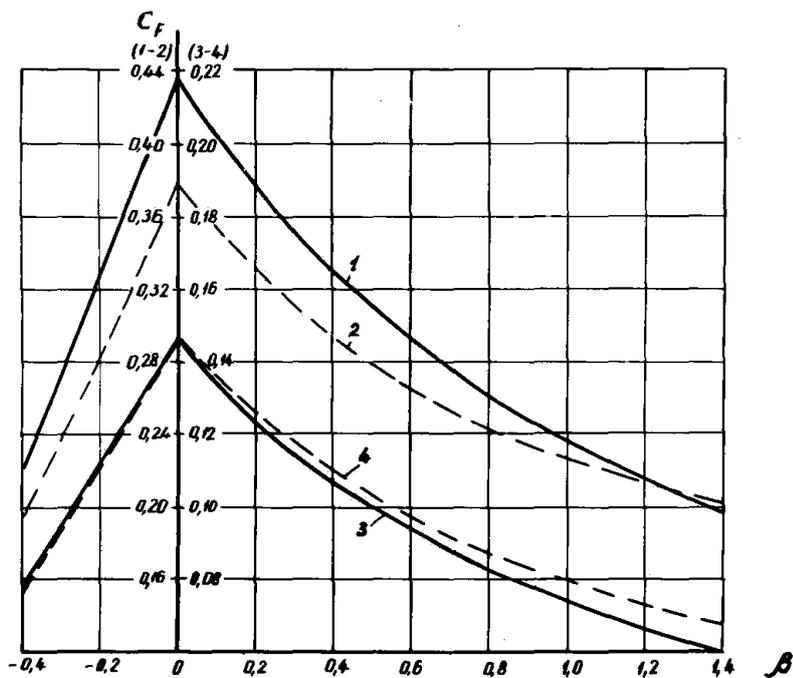


Рис. 2. Зависимости коэффициентов несущей способности от радиального уклона.

сти C_F в зависимости от радиальных уклонов для подшипников, имеющих $\theta = 60^\circ$ и $r_2 / r_1 = 2,5$ (кривые 1 и 2), и подшипников с $\theta = 30^\circ$ и $r_2 / r_1 = 2,0$ (кривые 3 и 4). Сплошные линии соответствуют условиям работы, когда $Re < 0,01$ и инерцией смазки можно пренебречь, а пунктирные линии построены при $Re = 0,4$.

Из представленных данных видно, что максимальная несущая способность будет при $\beta = 0$, когда выходная кромка параллельна плоскости пяты. Влияние центробежных сил инерции, снижающих несущую способность при больших углах $\theta = 60^\circ$, уменьшается с ростом радиального уклона и запираанием потока в радиальном направлении. При средних углах $\theta = 30^\circ$ инерция смазочного слоя с ростом радиального уклона оказывает положительное влияние, но общее снижение несущей способности с ростом β превосходит этот эффект. Поэтому, уклоны в радиальном направлении нежелательны.

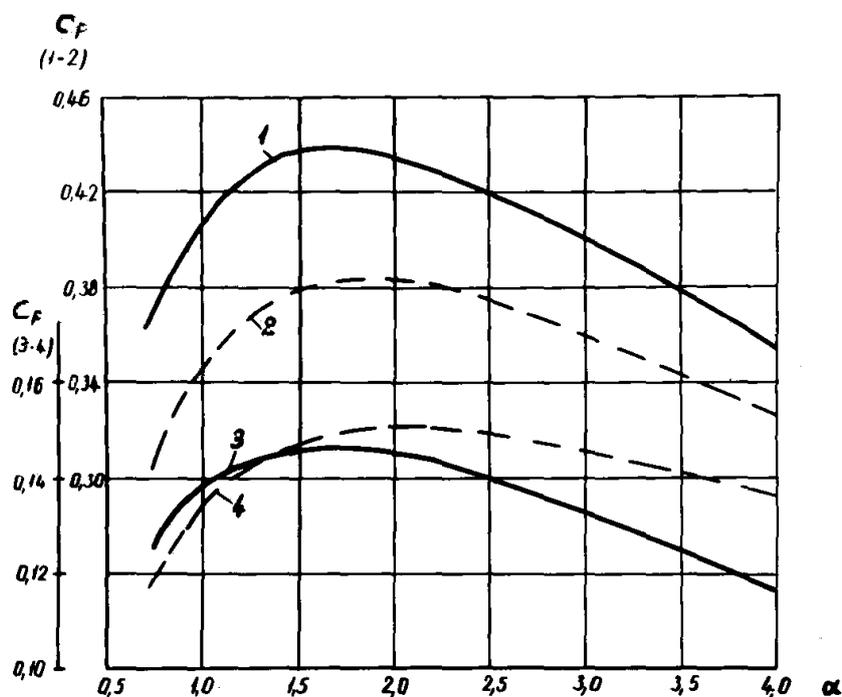


Рис. 3. Зависимости коэффициентов несущей способности от окружного уклона.

На рис. 3 показано влияние на несущую способность параметра α , характеризующего сужающийся уклон в направлении движения, при оптимальных значениях параметра $\beta = 0$. Для рассматриваемых подшипников максимальные значения C_F лежат в пределах 1,5 – 2,25, а изменения происходят значительно медленнее. При возрастании параметра α до 3 – 3,5, где наблюдается минимум коэффициента трения, снижение C_F

составляет менее 16%. Условие $\beta = 0$ реализуется конструктивно, если расположить ребро качания параллельно выходной кромке. При опоре подвижных кольцевых секторов на сферическую поверхность необходимые уклоны определяются относительными координатами установки сферических опор.

При установке ребра качания, направленного по радиусу, как это реализуется в ряде конструкций турбодетандеров, параметр β , характеризующий радиальный уклон, становится однозначно зависимым от параметра α .

$$\beta = \alpha \cdot \frac{b}{r_2} \cdot \frac{\sin \nu_C}{\sin \nu_C + \sin(\theta - \nu_C)}$$

Относительная угловая координата установки точки опоры от выходной

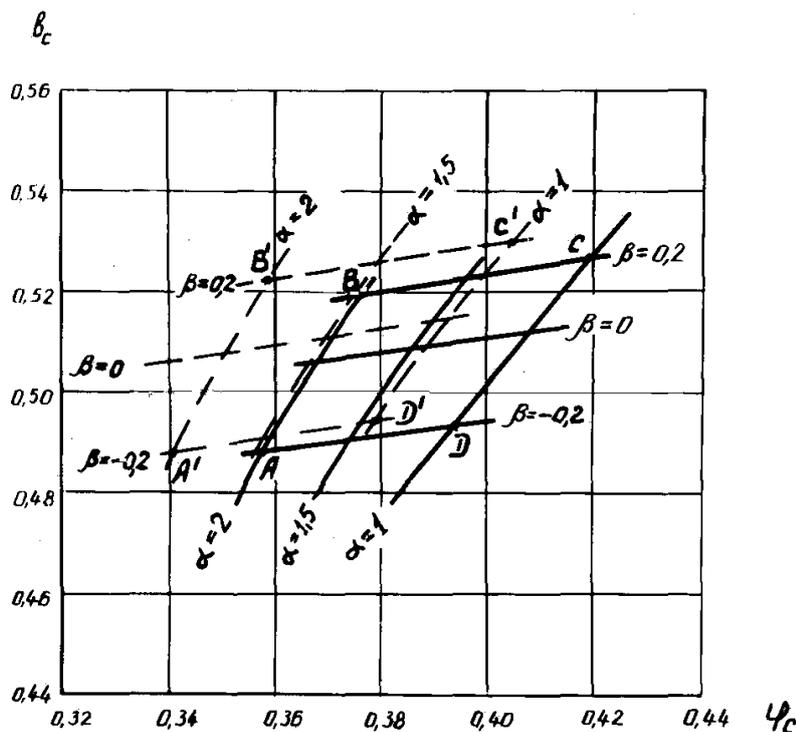


Рис. 4. Зависимости параметров, характеризующих наклоны рабочих поверхностей от координат точки опоры.

кромки представим в виде

$$\varphi_c = \frac{v_c}{\theta}$$

Относительная радиальная координата установки точки опоры от внутренней кромки имеет вид

$$b_c = \frac{r_c - r_1}{b}$$

На рис. 4 показано, какие зависимости должны принимать относительные координаты φ_c и b_c , чтобы α и β оставались постоянными, при $Re < 0,01$ (сплошные линии) и $Re = 0,4$ (пунктирные линии) для упорного

подшипника, имеющего $\theta = 60^\circ$ и $r_2 / r_1 = 2,5$.

Пересечение кривых $\alpha - const$ и $\beta - const$ дает сетку, которая смещается при изменении числа Рейнольдса. Из рисунка видно, какие значения α и β будет иметь рабочая поверхность при определенных числах Рейнольдса, если координаты φ_c и b_c заданы и не меняются в процессе работы. Расчеты опор с $\theta = 20 \dots 60^\circ$ и $r_2 / r_1 = 1,7 \dots 3$ показывают, что максимальные значения несущей способности получаются при выборе координат опорного узла, обеспечивающих работу с $\alpha = 1,5 - 2,5$ и $\beta = 0$.

Литература: 1. Коровчинский М.В. Теоретические основы работы подшипников скольжения. – М.: Машгиз, 1959. – 403 с. 2. Гапонов В.С., Столбовой А.С., Музыкин Ю.Д., Свиргун О.А. Расчет высокоскоростных упорных гидродинамических подшипников скольжения. Вісник ХНТУСГ, вип. 68.–Харків: ХНТУСГ, 2008.–С. 253 – 257. 3. Чернавский С.А. Подшипники скольжения. – М.: Машгиз, 1963.– 244 с.

УДК 539.3

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ МАШИН

Назаренко С.А., канд. техн. наук, Марусенко С.И. (г. Харьков, Украина)

The complex of theoretical, calculable and applied questions of new approach for the optimization of complicated technical systems are studied. The basic requirements were stated. The design principles were developed.

При разработке системного подхода к оптимизации машин необходимо учитывать все этапы жизненного цикла – от проектирования до утилизации; эффективно сочетать принципы композиции, декомпозиции и иерархичности;

обеспечить взаимодействие многообразных методов (математических, эвристических, экспериментальных) и специалистов различных профилей. Помимо компромиссного мультидисциплинарного и многокритериального характера предложенная методика решения оптимизационной проблемы отличается от канонизированной формы прежде всего более высокой сложностью (большим числом различных моделей и разнохарактерных переменных).

Задача оптимизации конструкций заключается в нахождении варьируемых параметров, принадлежащих допустимой области и минимизирующих (максимизирующих) целевую функцию (функционал качества) J_0 . Целевая функция представляет собой суперпозицию критериев качества, при этом в качестве весовой функции используются неопределенные множители Лагранжа. На проектные переменные могут накладываться как явные двусторонние ограничения, задаваемые из конструктивно-технологических соображений, так и функциональные ограничения типа равенств и неравенств, наложенные на функционалы J_j , неявным образом сужающие область варьирования. При этом значения функционалов определяются из решения задач анализа, описываемых уравнениями состояния. Вектор (функция) y переменных состояния, образующих пространство решений, может определять перемещения, температуры, потенциалы электрического поля и другое. При решении задач оптимизации конструкций в качестве варьируемых переменных h рассматриваются параметры распределения толщины; физико-механических свойств материалов, управляющих нагрузок; формы срединной поверхности, граничного контура, вырезов, количества, места приложения и величины сосредоточенных масс и жесткостей (стрингеры, шпангоуты и другое).

Целью работы было создание концепции формализованного подхода к мультидисциплинарной оптимизации машин на основе математических моделей с высокой степенью геометрической и физической информативности.

Сложность задачи, противоречивость критериев, большое число разнохарактерных конструктивных переменных, неформализуемость некоторых ограничений, различная точность и детерминированность моделей, требования унификации не позволяют решать математически строго задачу оптимизации конструктивных параметров непосредственно для полных моделей машин. Учитывая ее сложность, существенные различия в значимости конструктивных параметров и неформализуемость некоторых ограничений, основной концепцией оптимального проектирования таких сложных систем является многоуровневый иерархический подход. Проектирование выполняется сверху вниз. При этом результаты решения задачи предыдущего уровня используются в качестве исходных данных для решения задач оптимального проектирования последующего уровня. Процесс декомпозиции физико-механической модели на компоненты является плохо формализуемым творческим процессом. Поэтому построение системы уровней осуществляется обычно методом экспертных оценок. На нижнем уровне проектирования решаются задачи оптимизации основных деталей, на верхнем – конструкции в целом. Характер критериев зависит от уровня проектирования. На верхних уровнях это, как правило, стоимостные

критерии. На нижних - это разнородные специфические технические критерии, которые отображают особенности рабочего процесса, силового нагружения, температурного режима, технологии изготовления и т. д.

Сложные современные машины создаются как комбинация множества взаимодействующих между собой и с внешней средой конструктивных элементов, которая описывается достаточно сложной математической моделью. При анализе составных конструкций объем и сложность вычислений настолько велики, что необходимо сегментирование системы. На базе использования методов и принципов системного и объектно-ориентированного анализа можно осуществить декомпозицию абстрактной модели на составляющие и связи между ними, а также реализовать их формальное описание. От правильности выбранной стратегии зависит эффективность решения. Полная конструкция представляется в виде совокупности иерархически соподчиненных подсистем различных уровней с сохранением структур и принадлежности. Исследование всей конструкции следует базировать на независимом анализе, естественно заданных субструктур, а затем связывать эти подконструкции в единую систему. Изложенный подход делает возможным изъятие из полной расчетной модели некоторой ее части, перестроение сетки и более подробный анализ для выделенной области.

Процесс оптимального проектирования основных узлов машин раскладывается на этапы. Соответственно, конструктивные параметры искусственно разделяются на группы, варьируемые на каждом этапе с целью оптимизации соответствующих функционалов. Параметры h^0 определяются из решения задачи более высокого уровня. Предварительный анализ распределения коэффициентов чувствительностей позволяет разделить параметры по степени соизмеримости влияния на величины целевых функций. На первом этапе решается задача оптимизации параметров h^1 по критериям и функциональным ограничениям, характеризующим рабочий процесс. На втором этапе производится оптимизация параметров h^2 , в значительной мере определяющих прочностные и вибрационные характеристики. На третьем этапе варьируются конструктивные параметры "смешанного" типа h^{12} , влияние которых на рабочие и прочностные характеристики существенно и соизмеримо, с целью построения семейства Парето-решений. При этом конструктор может выбрать несколько решений для экспериментальной апробации. Участие на этом этапе конструктора с его субъективным выбором вариантов проекта объясняется необходимостью учета стоимостных, эксплуатационных, технологических и других критериев, что характерно для задач мультидисциплинарной оптимизации.

Разбиение на подпункты носит условный методологический смысл, поскольку физический процесс может иметь комплексный и взаимовлияющий характер. Предполагается, что связь между подмоделями однозначна, алгоритмизируема и корректна. Такая трактовка дает возможность формализовать процесс и использовать традиционный инструментальный анализ и синтеза. Моделирование структурными уравнениями, ориентированными на конкретный класс объектов, может включать большое количество методов из различных областей науки и техники с применением апробированных CAD/CAM/CAE-систем. Это может быть осуществлено как в ручном режиме, так и путем созда-

ния специализированных автоматизированных систем.

Введем на основе анализа структуры и типов связей между отдельными этапами общей проблемы следующие категории задач мультидисциплинарной оптимизации: последовательная (при независимом рассмотрении 1 и 2 этапов); полная (при наличии только 3 этапа и увеличении размерности и ширины ленты системы разрешающих уравнений весь набор оптимальных параметров достигается за одну итерацию); слабосвязанная (при этом выполняются итерации между различными этапами до тех пор, пока не будет достигнут желаемый уровень сходимости). Классификация может служить основой последующей унификации и стандартизации подходов. После сборки, состоящей в преобразовании модели, реализующей поставленную цель из заданных или определяемых подмоделей (структурно связанных и устойчивых), возможно построение многоуровневых иерархических систем.

Численная реализация задач мультидисциплинарной оптимизации требует значительных ресурсов памяти и больших затрат машинного времени. При решении задач оптимизации необходимо использовать ресурсы нескольких компьютеров параллельно, то есть реализовать кластерный подход и взаимодействие через высокоскоростные Интернет соединения. Причем модули сетевого взаимодействия, как и большинство остальных модулей комплекса, должны быть заменяемыми.

В качестве метода глобальной оптимизации будем использовать генетические алгоритмы, реализующие случайный поиск с централизованным управлением с использованием отбора и генетических механизмов воспроизводства. Оперируя совокупностью возможных решений, обрабатывается набор параметров, структурированный в виде цепочки конечной длины, а последующие поколения популяции решений генерируются с помощью генетических операторов отбора, кроссовера и мутации. В качестве метода локальной оптимизации при решении практических задач, характеризующихся высокими размерностью вектора варьируемых параметров и числом функциональных ограничений, в настоящее время наиболее предпочтительным представляется метод последовательной линеаризации. На каждом шаге метода последовательной линеаризации осуществляется следующий набор вычислительных этапов: решение исходной и сопряженной задач; вычисление функциональных производных или градиентов критериев целей и функциональных ограничений по варьируемым переменным; построение области линеаризации; решение задачи линейного программирования. Конструктивная форма условий оптимальности первого порядка имеет вид

$$\min \delta \vec{h}^T \vec{\nabla}_h J_0 \quad J_j + \delta \vec{h}^T \vec{\nabla}_h J_j = 0 \quad \vec{h} + \delta \vec{h} \in \delta U \cap U$$

Создана концепция нового подхода к решению комплексной многоуровневой задачи мультидисциплинарной оптимизации машин с использованием блочно-иерархического процесса. В построенной общей схеме приведены базовые принципы, которые будут использованы при дальнейших разработках. Введены на основе анализа структуры и типов связей между отдельными этапами общей проблемы категории задач мультидисциплинарной оптимизации.

ПАМЯТИ ПРОФЕССОРА ДУДКО ПЕТРА ДМИТРИЕВИЧА



Вот уже почти год как ушел из жизни Петр Дмитриевич Дудко – прекрасный человек, видный ученый, педагог, профессор и Учитель, посвятивший себя благородному делу – воспитанию подрастающего поколения и подготовке высококвалифицированных кадров, развитию высшей школы. Петр Дмитриевич прожил большую и трудную, насыщенную разными событиями жизнь. В этом году ему исполнилось бы 90 лет. Несмотря на преклонный возраст, он буквально до последних дней сохранял бодрость духа, занимал активную жизненную позицию, работал профессором Харьковского национального экономического университета и учил студентов, много времени уделял научной деятельности, писал замечательные книги. И главное, у него все получалось на высшем уровне. Он никогда не унывал, всегда находил

выход из самого трудного положения – будь то в мирное или грозное военное время. Написанные им научные книги и статьи отличались актуальностью и практичностью, лаконичностью и глубиной научного познания. Девизом жизни был высочайший профессионализм, честность и порядочность, которые он с честью передал своим ученикам. Ему всегда была присуща неумная тяга к знаниям, которая передавалась всем окружающим: студентам, преподавателям, производственникам, с которыми он постоянно был связан.

Петр Дмитриевич – один из организаторов и вдохновителей наших конференций. Он был их душой и сердцем, считал важным развитие союза науки и производства, популяризировал внедрение научных разработок в производство. Еще при жизни был признан классиком абразивной обработки деталей машин. Его имя стояло в ряду родоначальников современных технологий обработки высокоточных деталей.

Дудко Петр Дмитриевич родился 7 июля 1919 года в Полтавской области. В 1935 году окончил рабфак в г. Краматорске, а в 1941 году – Рубежанский химико-технологический институт (Луганская область) и получил специальность инженер-механик. В самом начале Великой Отечественной войны – 8 июля 1941 года был призван в Военно-морской флот. Проходил службу в Ленинградском отряде подводного плавания им. С.М. Кирова, а затем с 10 августа – в Севастопольском училище береговой обороны им. ЛКСМУ. С 30 октября 1941 го-

да принимал участие в Героической обороне Севастополя, где был тяжело ранен 14 января 1942 года. После ампутации правой руки был вывезен из Севастополя на Кавказ в Горийский госпиталь. За участие в боевых действиях награжден орденом “Красная звезда” и шестью медалями.

В мае 1942 года после выписки из госпиталя работал начальником штаба МПВО при Рубежанском горисполкоме, а затем перешел на преподавательскую работу в Рубежанский химико-технологический институт на кафедру технологии металлов. После закрытия этого института в сентябре 1949 года был переведен в Харьковский химико-технологический институт, который в 1950 году вошел в состав Харьковского политехнического института им. В.И. Ленина. 18 марта 1966 года Петр Дмитриевич успешно защитил кандидатскую диссертацию по проблемам доводки точных деталей свободным абразивом. С 1961 по 1974 год работал доцентом, затем заведующим кафедрой технологии приборостроения Харьковского института радиоэлектроники, где подготовил четырех кандидатов технических наук.

С 1976 года работал доцентом, а с 1996 года профессором кафедры техники и технологии Харьковского инженерно-экономического института (ныне Харьковского национального экономического университета). Здесь в изобилии раскрылись талант и дарования Петра Дмитриевича как педагога и научного работника. Он всегда был кумиром студентов и преподавателей. Непревзойденный авторитет завоевал, будучи на протяжении многих лет постоянным руководителем научно-технических семинаров при Республиканском Доме научно-технической пропаганды в г. Киеве по проблемам обработки точных деталей свободным абразивом. Большинство участников этих семинаров, не говоря уж о его учениках, в последствии стали кандидатами и докторами технических наук, постоянно испытывали на себе его отеческую заботу и внимание.

Петр Дмитриевич активно участвовал в общественной жизни своего университета и города Харькова. Был членом областного Совета ветеранов Великой Отечественной войны при обществе “Знание”. За свою жизнь он подготовил около 200 научных трудов (в том числе ряд монографий и учебных пособий), свыше 10 авторских свидетельств на изобретения.

Заслуживают особого внимания работы, написанные в последние годы:

1. Пономаренко В.С., Сіроштан М.А., Белявцев М.І., Дудко А.Д., Тимонін О.М. Системи технологій: навчальний посібник / Під ред. П.Д. Дудко. – Харків: Око, 2000. – 376 с.

2. Дудко П.Д., Крюк А.Г., Савченко Н.Ф., Чистяк В.Г., Шкурупий В.Г. Основы технологических систем: учебное пособие. – Харьков: Изд. ХГЭУ, 2002. – 248 с.

3. Гринева В.Н., Дудко П.Д., Крюк А.Г., Пономаренко В.С., Чистяк В.Г., Шкурупий В.Г. Проблемы развития современного общества: культура, инновации, высокие технологии и экология: научное издание. – Харьков: Изд. ХГЭУ, 2003. – 300с.

4. Гринева В.Н., Дудко П.Д., Пономаренко В.С., Тимонин А.М., Крюк А.Г., Савченко Н.Ф., Чистяк В.Г., Шкурупий В.Г. Системы технологий: учебное пособие / Под ред. П.Д. Дудко, А.Г. Крюка. – Харьков: Изд. ХГЭУ, 2003. – 292 с.

5. Гринева В.Н., Дудко П.Д., Крюк А.Г., Савченко Н.Ф., Шкурупий В.Г., Браташевский А.Ю. Товароведение: учебное пособие / Под ред. П.Д. Дудко, А.Г. Крюка. – Харьков: ИД "ИНЖЭК", 2005. – 456 с.

Петр Дмитриевич относился к той категории воинов-фронтовиков, которые, разгромив злейшего врага человечества – немецкий фашизм, не страшась усталости, смело сели за парты, блестяще овладели знаниями и своим творческим трудом, научными достижениями и успехами в подготовке научных и производственных кадров, внесли огромный вклад в укрепление мощи и обороноспособности нашей страны. Для всех нас Петр Дмитриевич навсегда останется воином, героем-победителем, верным сыном своего Отечества, до конца выполнившим свой священный долг перед Родиной, образцом мужества и силы духа, беззаветного служения народу и развитию научно-технического прогресса на благо человечества.

Оргкомитет конференции

© Харьковская научно-производственная
корпорация "ФЭД", 2009

Научное издание

Труды 15-й Международной научно-технической конференции

Физические и компьютерные технологии

2–3 декабря 2009 года, г. Харьков

Составили: Новиков Федор Васильевич
Якимов Александр Васильевич

Ответственный за выпуск
Фадеев В.А.

Оформление оригинал-макета
Бондарь Н.Б., Новиков Д.Ф.

Подписано к печати 19.11.2009. Формат 60x90 1/16
Бумага офсетная. Усл.-печ. л. 32,7. Уч.-изл. л. 27,1
Тираж 3000. Заказ № 158

Отпечатано в типографии завода "ФЭД". 61023, г. Харьков, ул. Сумская, 132