

*12 - я Международная  
научно-  
техническая  
конференция*

**ФИЗИЧЕСКИЕ И КОМПЬЮ-  
ТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

*7 – 8 июня  
2006 г*

**г. Харьков**

Харьковская научно-производственная корпорация "ФЭД"  
Харьковский национальный экономический университет  
Одесский национальный политехнический университет  
ОАО Завод "Потенциал"  
ЗАО Завод "Южкабель"  
ОАО ХМЗ "Свет шахтера"  
ОАО "Гидропривод"

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Ассоциация технологов-машиностроителей Украины  
Институт сверхтвердых материалов НАН Украины  
Институт проблем машиностроения НАН Украины  
Институт машин и систем НАН Украины

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Харьковский национальный технический университет радиоэлектроники  
Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет  
Харьковская государственная академия железнодорожного транспорта

Донецкий национальный технический университет  
Сумской государственный университет

Национальная Металлургическая Академия Украины  
Севастопольский национальный технический университет  
Восточнукраинский национальный университет им. В. Даля  
Луцкий государственный технический 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"

ХГ Авиационное производственное предприятие

ХГ Приборостроительный завод им. Шевченко

Харьковское агрегатное конструкторское бюро

НТК "Эльбор-4"

Гомельское ПО "Кристалл"

Жешувский технологический университет, Польша

Кафедра UNESCO "Интеллектуальное моделирование и адаптация нетрадиционных технологий к проблемам перспективного обучения и общественного прогресса"

## **ТРУДЫ 12-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО- ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**"ФИЗИЧЕСКИЕ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

**INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND  
TECHNICAL CONFERENCE**

Харьков 2006

## УДК 62-65: 621.382.82

### Физические и компьютерные технологии.

Труды 12-й Международной научно-технической конференции, 7-8 июня 2006г. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2006. – 284 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:**

<b>Сопредседатели:</b>		Кривошапка Ю.Н., к.э.н.	(Харьков)
Якимов А.В., д.т.н.	(Одесса)	Ларшин В.П., д.т.н.	(Одесса)
Новиков Ф.В., д.т.н.	(Харьков)	Малыхин В.В., к.т.н.	(Курск)
Фадеев В.А., к.т.н.	(Харьков)	Крюк А.Г., к.т.н.	(Харьков)
		Морачковский О.К., д.т.н.	(Харьков)
<b>Члены совета:</b>		Яценко С. М.	(Харьков)
Гринева В.Н., д.э.н.	(Харьков)	Новиков Г.В., к.т.н.	(Харьков)
Дудко П.Д., к.т.н.	(Харьков)	Ткаченко В.П., к.т.н.	(Харьков)
Дитиненко С.А., к.т.н.	(Харьков)	Шепелев А.А., д.т.н.	(Киев)
Воробьев Ю.С., д.т.н.	(Харьков)	Шкурупий В.Г.	(Харьков)
Коломиец В.В., д.т.н.	(Харьков)	Ямников А.С., д.т.н.	(Тула)

#### **ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ:**

Гапонов В.С., д.т.н.	(Харьков)	Новоселов Ю.К., д.т.н.	(Севастополь)
Евстратов В. А., д.т.н.	(Харьков)	Новиков С.Г., к.т.н.	(Курск)
Золотарев В.М., к.т.н.	(Харьков)	Осипов В.А., к.т.н.	(Сумы)
Бреславский Д.В., д.т.н.	(Харьков)	Проволоцкий А.Е., д.т.н.	(Днепропетровск)
Ерошин С. С., д.т.н.	(Луганск)	Савченко Н.Ф., к.т.н.	(Харьков)
Жолткевич Г.Н., д.т.н.	(Харьков)	Скобло Т.С., д.т.н.	(Харьков)
Карпушенко В.П., к.э.н.	(Харьков)	Сизый Ю.А., д.т.н.	(Харьков)
Клименко С.А., д.т.н.	(Киев)	Тернюк Н.Э., д.т.н.	(Харьков)
Королев А.В., д.т.н.	(Саратов)	Тимофеева Л.А., д.т.н.	(Харьков)
Симсон Э.А., д.т.н.	(Харьков)	Ткачук Н.А., д.т.н.	(Харьков)
Степанов М.С., д.т.н.	(Харьков)	Усов А.В., д.т.н.	(Одесса)
Лавриненко В.И., д.т.н.	(Киев)	Худобин Л.В., д.т.н.	(Ульяновск)
Линчевский П.А., д.т.н.	(Одесса)		
Матюха П.Г., д.т.н.	(Донецк)		

Труды воспроизводятся непосредственно с авторских оригиналов.

© Харьковская научно-производственная  
корпорация «ФЭД», 2006

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ И СТАБИЛЬНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ГЕРМЕТИЧЕСКИХ РЕЗЬБ В ГОРЛОВИНАХ ГАЗОВЫХ БАЛЛОНОВ В УСЛОВИЯХ КРУПНОСЕРИЙНОГО И МАССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, Иванов И.Е. (г. Харьков, г. Мариуполь, Украина)

*Effective technological process of machining of a precision carving aperture in a mouth of a cylinder is offered and proved.*

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. Они рассчитаны на высокое рабочее давление 19,6 МПа и объем 50 литров, изготавливаются из стальных бесшовных труб – из легированной (конструкционной хромомолибденовой) стали марки 30ХМА ГОСТ 4543-71 – путем последовательной закатки днища и горловины. Основным конструктивным элементом баллона является вентиль, который служит для заполнения газом баллона, а также для «открывания» и «закрывания» подачи топлива.

Существуют различные маршруты изготовления баллонов, однако в итоге они сводятся к нескольким типовым, которые и положены в основу технологических процессов, используемых на Уральском металлургическом заводе и Мариупольском металлургическом комбинате. Необходимо отметить, что все производство автомобильных баллонов – массовое и конвейерное, характеризуется применением автоматических и поточных механизмов. Поэтому появление брака продукции при таком производстве ведет к большим убыткам.

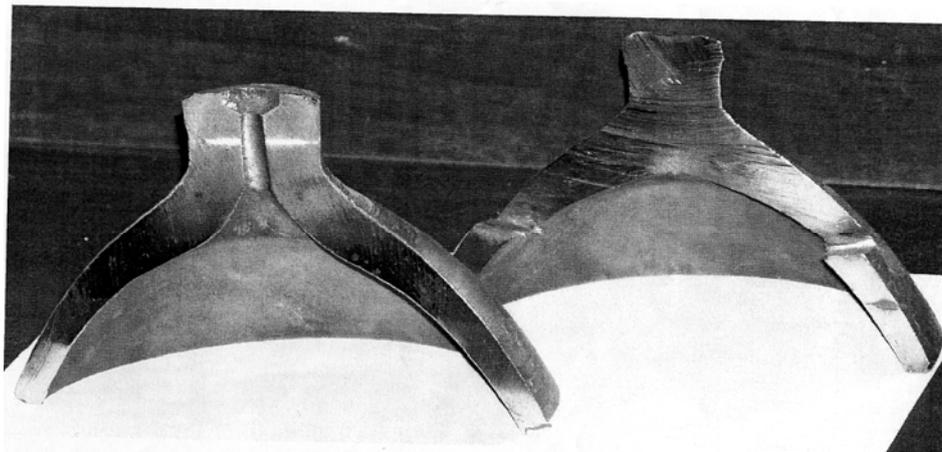


Рис. 1. Горловины баллонов в разрезе.

Первоначально поступающие в цех горячекатаные трубы (с температурой нагрева металла 400–900<sup>0</sup>С) разрезают на трубонарезных станках для резки труб на мерные заготовки длиной 1707–1713 мм. После резки производится последовательный нагрев и закатка днища и горловины баллона в закатных машинах методами пластического деформирования. В процессе закатки возможно получение доста-

точно точных размеров горловины баллона, что крайне важно для качественного изготовления в ней отверстия с конической резьбой, предназначенного для ввинчивания вентиля, рис.1. Согласно техническим требованиям, вентиль должен плотно ввинчиваться в отверстие и не допускать потравливания газа из баллона, так как это может привести к воспламенению газа и взрыву. В связи с этим, предусмотрено нарезание в отверстии конической резьбы типа К29ГАЗ. Количество винтов резьбы с полным профилем в горловине должно быть не менее 6.

Однако, выполнить указанные технические требования весьма сложно, что приводит к высокому уровню брака. По имеющимся данным, именно при механической обработке резьбы в горловине баллонов брак достигает 15%. Это связано с несовершенством действующего технологического процесса механической обработки резьбового отверстия в горловине баллона, характеристики которого приведены в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 1

Характеристики технологического процесса обработки

№ п/п	Содержание переходов	Инструмент	Диаметр обработки, мм	Длина обработки, мм	Скорость резания, м/мин	Подача, мм/об	Частота вращения, об/мин
1	зацентрировать торцы горловины сверлом $\varnothing 32$ мм	сверло 2301-0113 ГОСТ10903-77	32	14	18,1	0,28	180
2	сверлить отверстие $\varnothing 21$ мм	сверло 2301-0073 ГОСТ10903-77	21	30	16,5	0,2	250
3	подрезать торец начерно	резец АМ 14976-503	46	4+1	43,3	0,2	250
4	обточить пояс $\varnothing 46-03$ мм с чистовой подрезкой торца в размер $10+0,5$ мм	резец АМ 14976-502,  резец АМ 14976-503	55  46/25,4	10+1  1	43  36	0,2	250  250
5	зенкеровать конус отверстия под резьбу коническую $\varnothing 27,8$ мм ГОСТ 9909-70	зенкер конический АС14976-500.501	25,4/21		10	0,4	125
6	нарезать резьбу $\varnothing 27,8$ мм	метчик АР-2-497	27,8	17,667	3,75	1,814	43

Анализ действующего технологического процесса показал, что базовые приспособления установлены на станинах не соосно со шпинделем станка и зачастую плохо закреплены. Это приводит к перекосу инструмента, баллона, а отсюда и к частым поломкам, большому биению инструмента, износу направляющих станины станка. Кроме того, выбранные базовые поверхности создают значительные погрешности базирования. Так, если у обрабатываемого баллона пояс выполнен с наименьшим допуском, т.е. диаметр пояса равен 47,1 мм, или эксцентриситет пояска относительно наружной поверхности баллона составляет в среднем 0,64 мм, то

погрешность установки баллона в приспособлении составит 1,5–1,7 мм. Это приведет к тому, что отверстие в баллоне в данном случае будет обработано не по центру горловины, а из-за биения сверла может быть разбито и иметь овальную форму. Отклонение от круглости в среднем составляет 0,22 мм.

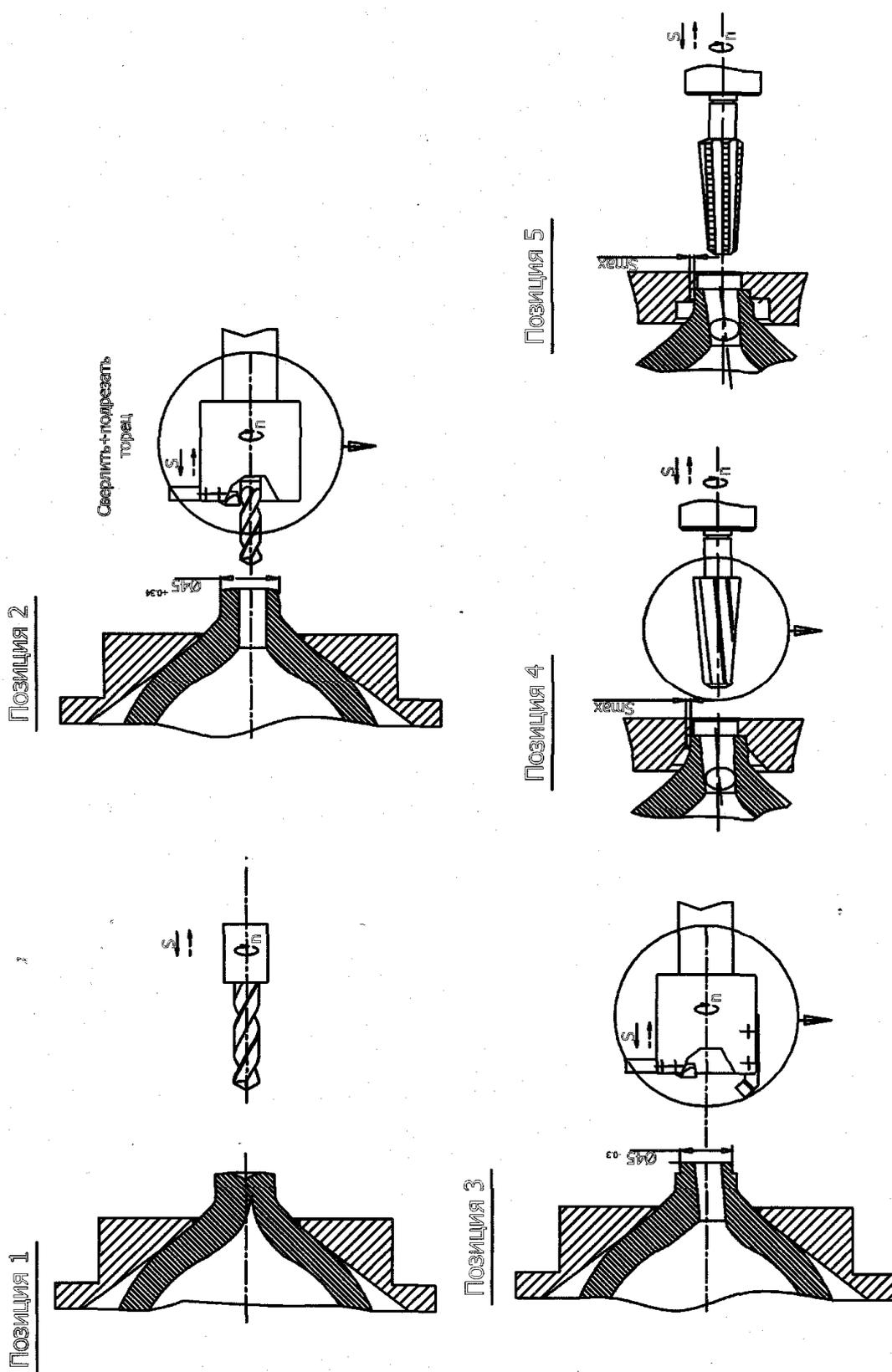


Рис. 2. Действующий (базовый) технологический процесс механической обработки резьбового отверстия в горловине автомобильного баллона.

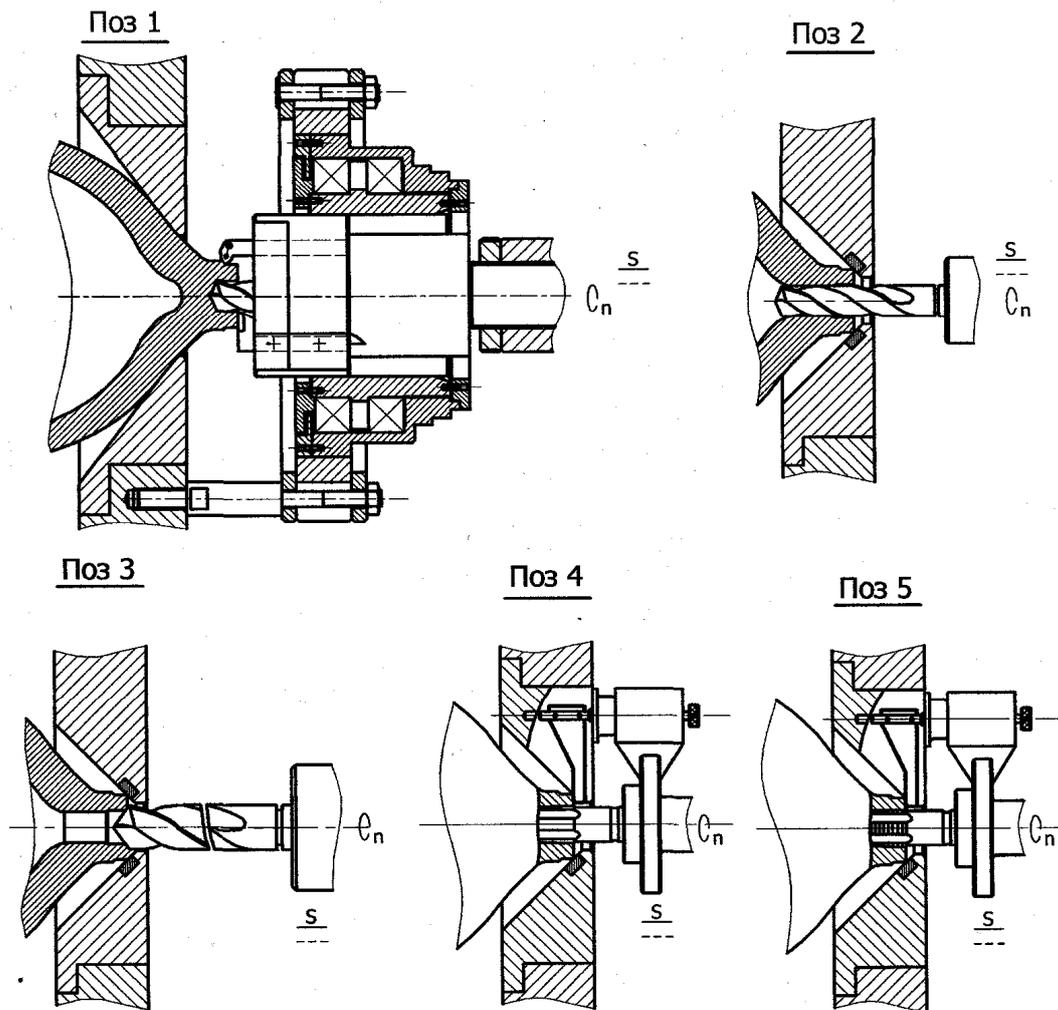


Рис. 3. Новый технологический процесс механической обработки резьбового отверстия в горловине автомобильного баллона.

После термической обработки перед развёртыванием отверстия, чтобы снять окалину, поясок ещё раз обрабатывается. Однако, это приводит к появлению новых погрешностей, влияющих в ещё большей степени на дальнейшую обработку. Зачастую при развёртывании применяется нестандартный режущий инструмент, изготовленный из сверла. Кроме того, из-за отклонения торца горловины от базовой поверхности после обработки на первой операции наблюдается колебание высоты горловины, что приводит к появлению брака при развертывании и особенно при нарезании резьбы. Чтобы как-то этого избежать, оставляют большие припуски под резьбу, что приводит к заклиниванию метчиков и их поломке.

Из этого можно заключить, что выбранные в действующем технологическом процессе схемы базирования приводят к значительным погрешностям, а именно: отклонению от соосности оси отверстия относительно оси наружного диаметра горловины; отклонению от перпендикулярности торца к оси наружного диаметра горловины. 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

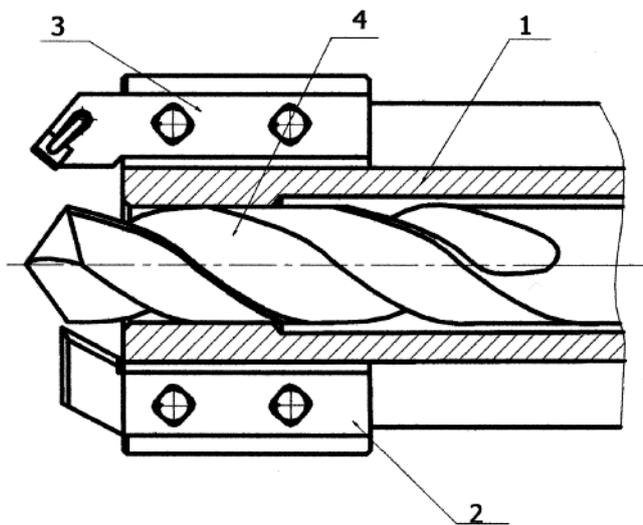


Рис. 4. Инструментальная головка: 1 – корпус; 2, 3 – подрезной и проходной резцы; 4 – сверло.

цилиндрический ступенчатый корпус с пазами для крепления резцов со ступенчатым центральным отверстием для установки сверла. Концентрация операции возлагает задачу обеспечения точности взаимного расположения обрабатываемых поверхностей на высококвалифицированного рабочего инструментального производства; позволяет значительно сократить основное время за счет его совмещения, а также сократить вспомогательное время на установку и снятие заготовки благодаря уменьшению общего количества установок. В свою очередь, концентрация операции приводит к увеличению упругих деформаций технологической системы, которые обуславливают увеличение систематических и случайных погрешностей. Поэтому с целью повышения жесткости технологической системы разработан и внедрен кондуктор (рис. 5), воспринимающий реакции сил резания. Кондуктор представляет собой корпус с подшипниками качения и кондукторную втулку. Корпус установлен между фланцами, закрепленными на базирующем кронштейне с помощью анкерных болтов.

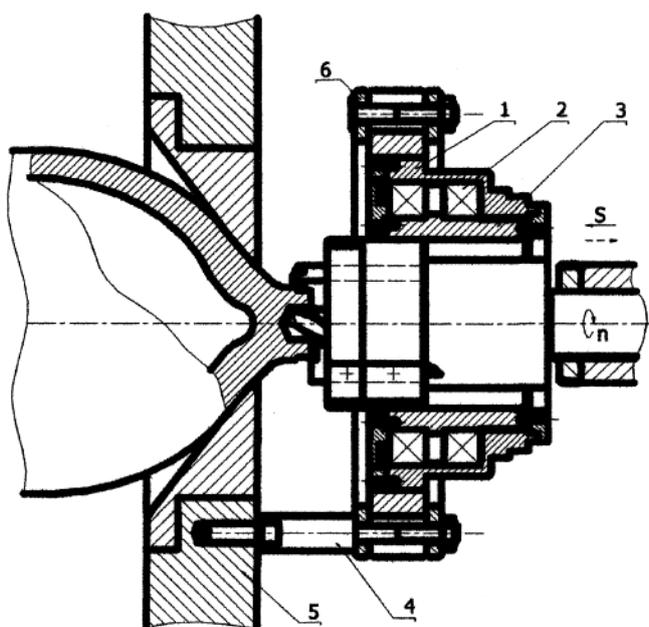


Рис. 5. Кондуктор: 1 – корпус; 2 – подшипник качения; 3 – кондукторная втулка; 4 – анкерный болт; 5 – базирующий кронштейн; 6 – фланцы.

маршрут механической обработки с применением прогрессивной схемы базирования и способа корректировки рабочих ходов, специальных приспособлений и режущего инструмента [1, 2], рис. 3.

С целью повышения точности получаемых размеров, взаимного расположения поверхностей отверстия и наружного диаметра, а также формы обрабатываемых элементов, разработана, изготовлена и внедрена инструментальная головка, осуществляющая одновременно сверление отверстия диаметром 22 мм, подрезку торца и наружное обтачивание (рис. 4). Она представляет собой цилиндрический ступенчатый корпус с пазами для крепления резцов со ступенчатым центральным отверстием для установки сверла. Концентрация операции возлагает задачу обеспечения точности взаимного расположения обрабатываемых поверхностей на высококвалифицированного рабочего инструментального производства; позволяет значительно сократить основное время за счет его совмещения, а также сократить вспомогательное время на установку и снятие заготовки благодаря уменьшению общего количества установок. В свою очередь, концентрация операции приводит к увеличению упругих деформаций технологической системы, которые обуславливают увеличение систематических и случайных погрешностей. Поэтому с целью повышения жесткости технологической системы разработан и внедрен кондуктор (рис. 5), воспринимающий реакции сил резания. Кондуктор представляет собой корпус с подшипниками качения и кондукторную втулку. Корпус установлен между фланцами, закрепленными на базирующем кронштейне с помощью анкерных болтов.

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 цилиндрического пояса и торца горловины баллона от чер-

новой базы образовавшаяся кромка принимается за чистовую базу с базированием на внутреннюю коническую поверхность опорного элемента (тарелки). Иными словами, для остальных позиций технологического процесса основными базами будут являться поверхности, обработанные на первой позиции, а именно: наружный диаметр и торец горловины баллона; с целью материализации оси баллона предусмотрено использование базирующего конуса. 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 наружного диаметра горловины, мм;  $\alpha$  – угол базирующего конуса.

С целью реализации процесса выверки положения обрабатываемой заготовки в условиях крупносерийного производства разработана и изготовлена система автоматизированной подналадки останова рабочего хода инструментальной головки, рис. 6. Система позволяет корректировать рабочий ход инструментальной головки в зависимости от глубины вхождения горловины баллона в базирующий конус при различных диаметрах горловин в пределах допуска. Система подналадки представляет собой комплект деталей, смонтированных на тарелке с базирующим конусом, вдоль образующей которого выполнен паз, в нем размещен подпружиненный упор. На стержне упора жестко закреплена пластина, обеспечивающая срабатывание емкостного датчика КВП-8. Подналадка останова рабочего хода инструментальной головки достигается тем, что при установке баллона с меньшим наружным диаметром горловины, последняя несколько глубже входит в центрирующий конус и, следовательно, дальше выталкивает упор с пластиной, благодаря чему датчик срабатывает раньше, обеспечивая постоянную глубину подачи инструмента в горловину баллона. Точность останова инструментальной головки определяется точностью срабатывания датчика и равняется 0,15 мм.

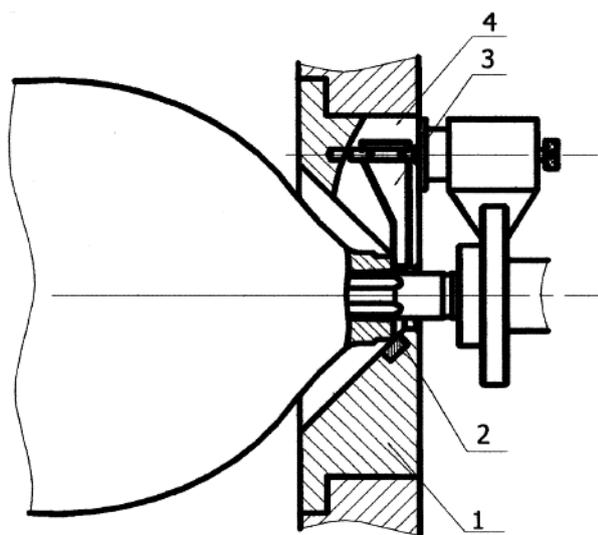


Рис. 6. Схема наладки останова рабочего хода инструментальной головки: 1 – базирующий конус; 2 – торец горловины; 3 – подпружиненный упор; 4 – паз.

Таким образом, возникающая при обработке погрешность базирования в осевом направлении компенсируется установкой пластины емкостного датчика на специальный упор, контактирующий с обработанным торцом горловины баллона. Это позволяет в каждом конкретном случае обработки ход инструментальной головки определить положением торца горловины. При обработке баллонов с разными диаметрами горловин рабочий ход инструментальной головки изменяется на величину, соответствующую более или менее глубокой посадке баллона в конической части тарелки, что обеспечивает получение размера

конуса и резьбы с точностью  $\pm 0,75 \cdot P$ , где  $P$  – шаг нарезаемой резьбы, равный 1,815 мм, т.е. допуск составляет  $\pm 1,4$  мм.

Для выверки (юстировки) положения осей шпиндельных инструментальных головок относительно осей базирования баллонов разработаны, изготовлены и внедрены контрольные устройства, позволяющие выставлять оси шпинделей инструментальных головок относительно приспособлений с точностью 0,005 мм.

Таблица 2

Показатели качества обработки для базового и нового технологических процессов

Варианты технологического процесса	Всего обработано баллонов, шт	Всего забраковано баллонов, шт/%	В том числе по видам дефектов, шт/%				
			рваная резьба	прослабленная резьба	тугая резьба	неполный профиль резьбы	поломка метчика
базовый	1670	260/15,5	72/4,31	48/2,84	46/2,75	38/2,27	56/3,35
новый	1670	22/1,31	6/0,35	4/0,24	4/0,24	3/0,18	5/0,3

Применение нового технологического процесса механической обработки позволило существенно повысить точность и качество изготовления резьбовых отверстий в горловинах автомобильных баллонов, табл. 2.

**Литература:** 1. Иванов И.Е., Новиков Ф.В. Влияние методов формообразования на точность механообработки. – Физические и компьютерные технологии. Труды 11-й Межд. научн.-техн. конф. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2005. – С. 108–113. 2. Матвеев В.В. Нарезание точных резьб (машинными метчиками). – М.: Машиностроение, 1968. – 116 с. 3. Иванов И.Е. Расчет погрешности формообразования при механической обработке // – Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. – “Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні”. – 2005. – Вип. 33. – С. 143-148.

УДК 621.923

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ СВІТЛОВІДБИВАЮЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ТОНКОГО ЛИСТА І СТРИЧОК

**Шкурупій В.Г., Новиков Ф.В.,** докт. техн. наук (м. Харків, Україна)

*Increase of efficiency of technology of finishing processing of surfaces of details from a thin sheet and tapes.*

З метою зниження маси, габаритів і економії конструкційних матеріалів при виготовленні сучасних машин і систем широко використовуються деталі з тонкого листа і стрічок. Частина таких деталей працює в умовах впливу світлового потоку, що приводить до нерівномірного нагрівання, виникнення значних температурних деформацій і до зниження експлуатаційних властивостей виробів. До них відносяться різного роду телескопічні системи, довгомірні трубчасті елементи, деталі, які використовуються в космічних літальних апаратах, наприклад, елементи зовнішніх оболонок, пружні виносні елементи, трубки, що плоско завертаються (штанги систем гравітаційної орієнтації і стабілізації, антени та ін.), виготовлені з матеріалів з особливими властивостями пружності і теплового лінійного розширення (хромонікелевих, мідно-берилієвих сплавів та ін.).

Зменшити температуру нагрівання деталей, що працюють в умовах впливу

світлового потоку, можна за рахунок створення на них світловідбивних поверхонь, у тому числі методами механічної і фізико-технічної обробки [1]. Однак, у даний час відсутні практичні рекомендації з технологічного забезпечення високої світловідбивної і випромінювальної здібностей поверхонь деталей з тонкого листа і стрічок. Не досліджені питання взаємозв'язку шорсткості й оптичних характеристик оброблених поверхонь, що не дозволяє науково обґрунтовано підійти до вибору оптимальних методів і умов обробки.

Перспективними є процеси абразивної й електрохімічної обробки, що можуть забезпечити необхідні значення цих характеристик. Разом з тим, дані процеси багатofакторні, дають не стабільні результати, особливо при фінішній обробці тонких пружних стрічок механічними методами. Ці процеси супроводжуються залишковими деформаціями в матеріалі стрічок, які розповсюджуються на розміри, перебільшуючи товщину стінок деталей. У зв'язку з цим дані процеси вимагають подальшого вивчення. Практична реалізація цих процесів недостатньо досліджена для їхнього серійного застосування. Усе це вказує на необхідність проведення комплексу теоретичних і експериментальних досліджень по технологічному забезпеченню геометричних і оптичних характеристик поверхонь деталей з тонкого листа і стрічок з метою підвищення їхніх експлуатаційних властивостей. Тому в роботі вирішується важлива й актуальна задача розробки ефективного технологічного процесу фінішної абразивно-електрохімічної обробки поверхонь деталей з тонкого листа і стрічок для

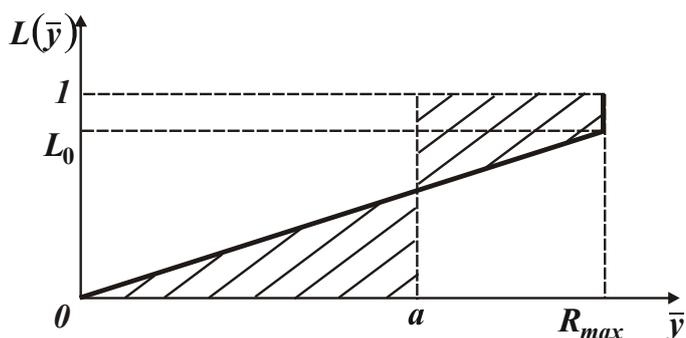


Рис. 1 Загальний вид безрозмірної функції  $L(\bar{y})$ , яка описує відносну опорну довжину профілю (заштрихована площа профілю поверхні визначає положення середньої лінії  $\bar{y} = a$ ).

додання їм необхідних геометричних і оптичних характеристик. Необхідність рішення даної задачі продиктована також проблемами створення світловідбиваючих матових поверхонь деталей, що забезпечують підвищення їхньої зносостійкості і масло утримання, наприклад, пара тертя торцевих ущільнень або що забезпечують естетичні властивості (деталі термостата і т.п.).

Для цього в роботі розроблена нова математична модель формування шорсткості поверхні при абразивній обробці [2–5] (яка є подальшим розвитком запропонованого професорами Корольовим А.В. і Новосьоловим Ю.К. теоретично-ймовірного підходу при шліфуванні), що дозволило досить просто з позиції теорії ймовірностей визначити основні параметри шорсткості (рис. 1):

Для цього в роботі розроблена нова математична модель формування шорсткості поверхні при абразивній обробці [2–5] (яка є подальшим розвитком запропонованого професорами Корольовим А.В. і Новосьоловим Ю.К. теоретично-ймовірного підходу при шліфуванні), що дозволило досить просто з позиції теорії ймовірностей визначити основні параметри шорсткості (рис. 1):

$$l_0 = \frac{1}{1 - L_0 \cdot (1 - \sin \gamma)}, \quad (1)$$

$$\frac{R_a}{R_{max}} = L_0 \cdot (1 - 0,5 \cdot L_0)^2 = \frac{\left(1 - \frac{1}{l_0}\right)}{(1 - \sin \gamma)} \cdot \left[1 - 0,5 \cdot \frac{\left(1 - \frac{1}{l_0}\right)}{(1 - \sin \gamma)}\right]^2 \quad (2)$$

і з використанням формули Агабабова С.Г. установити їхній зв'язок з оптичними характеристиками обробленої поверхні:

$$\varepsilon_{uw} = \frac{\varepsilon_2}{1 - (1 - A_2) \cdot (1 - F)}, \quad (3)$$

де  $l_0$  – відносна довжина профілю, м;  $R_a, R_{max}$  – відповідно середньоарифметичне відхилення профілю і максимальне значення висотного параметра шорсткості поверхні, мкм;  $L_0$  – безрозмірна величина, яка визначає ступінь зносу ріжучих країв зерен і змінюється в межах 0...1;  $\gamma$  – половина кута при вершині абразивного зерна, що ріже, град;  $F = F_2 / F_{uw}$  – фактор шорсткості поверхні (по нашим даним  $F = l / l_0$ );  $F_2, F_{uw}$  – відповідно площі гладкої і шорсткої поверхонь, м<sup>2</sup> (рис 2,а);  $\varepsilon_{uw}$  – коефіцієнт випромінювання шорсткої поверхні;  $\varepsilon_2$  і  $A_2$  – відповідно коефіцієнти випромінювання і поглинання гладкої поверхні (коефіцієнт поглинання  $A_{uw}$  визначається по залежності, ідентичної (3), а коефіцієнт відбивання світла  $\rho_{uw}$  – по залежності  $\rho_{uw} = 1 - A_{uw}$ ).

Таблиця 1

Розрахункові значення параметра  $F$  і відносин  $R_{max} / R_a$  і  $R_a / R_{max}$

$L_0$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$F (\sin \gamma = 0,5)$	1	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
$F (\sin \gamma = 0,9)$	1	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,9
$R_{max} / R_a$	$\infty$	11,1	6,25	4,54	3,85	3,57	3,4	3,39	3,45	3,7	4,0
$R_a / R_{max}$	0	0,09	0,162	0,217	0,256	0,281	0,294	0,295	0,29	0,277	0,25

З приведених залежностей випливає, що оптичні характеристики поверхонь визначаються не просто параметрами шорсткості  $R_a$  і  $R_{max}$ , а їх відношенням  $R_a / R_{max}$ , що може змінюватися в досить широких межах: 0...0,29 (табл. 1). Це вказує на можливість значного поліпшення оптичних характеристик оброблюваних світловідбивних поверхонь і відповідно експлуатаційних властивостей деталей з тонкого листа і стрічок, розглядаючи як критерії оцінки шорсткості відносну довжину профілю  $l_0$  і відношення середньоарифметичного відхилення профілю до максимального значення висотного параметра шорсткості поверхні ( $R_a / R_{max}$ ). Як показано вище, критерії  $l_0, R_a / R_{max}$  і фактор шорсткості  $F$  аналітично зв'язані між собою. Так, зі зменшенням  $R_a / R_{max}$  фактор шорсткості  $F$  збільшується, а  $l_0$  зменшується. Відповідно коефіцієнти випромінювання  $\varepsilon_{uw}$  і поглинання  $A_{uw}$  оброблюваної поверхні зменшуються, а коефіцієнт відбивання світла  $\rho_{uw}$  збільшується. Отже, з погляду підвищення відбивної здатності поверхні необхідно відношення  $R_a / R_{max}$  і відносну довжину профілю  $l_0$  зменшувати, а фактор шорсткості  $F$  збільшувати.

У роботі введений новий параметр - критерій шорсткості  $F'$ , визначений з умови енергетичної рівноваги регулярного або нерегулярного профілю, що утвориться при обробці поверхні, і запропонована методика його розрахунку на основі визначення координат умовних центрів ваги  $x_{Ц.Т.}$  і  $y_{Ц.Т.}$  площин дійсного профілю шорсткості по відношенню до координат умовного центру ваги середньоарифметич-

ного розподілу відхилень профілю (рис. 2,б) [6]. Відношення відстані до умовного центру ваги середньоарифметичного розподілу відхилень профілю і відстані умовного центру ваги дійсних відхилень профілю визначається:

$$F' = \sqrt{\frac{x_{\text{Ц.Т.А}}^2 + y_{\text{Ц.Т.А}}^2}{x_{\text{Ц.Т.В}}^2 + y_{\text{Ц.Т.В}}^2}} \quad (4)$$

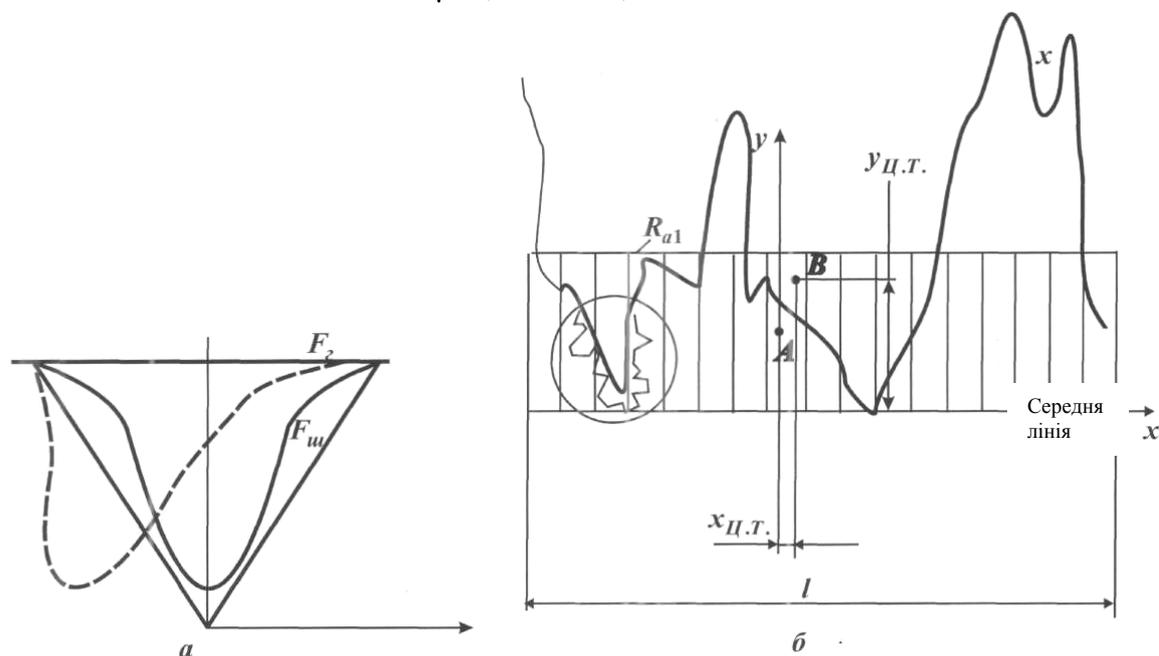


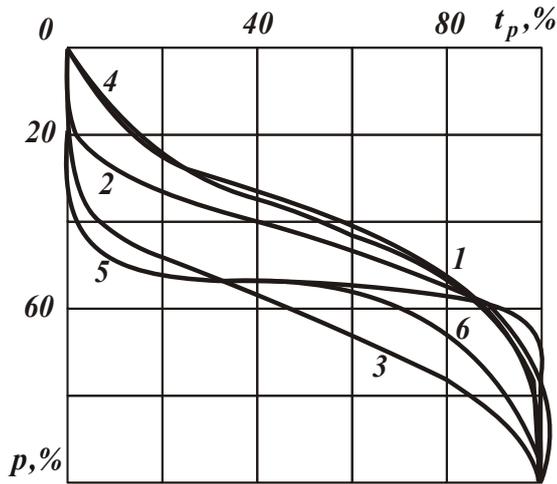
Рис. 2. Розрахункові схеми для визначення критерію шорсткості поверхні: а – западини різної форми; б – профіль шорсткості.

Для поверхонь із синусоїдальним профілем шорсткості залежність (4) спрощується ( $x_{\text{Ц.Т.В}} = 0$ ):

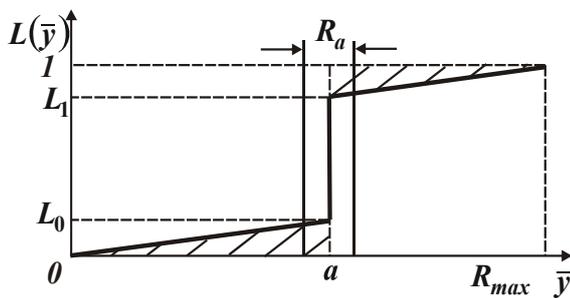
$$F' = 1 - \frac{R_a}{2H_{\min}} \approx 1 - \frac{R_a}{R_{\max}} \quad (5)$$

Цим показано, що параметри  $F'$  і  $R_a/R_{\max}$  зв'язані між собою й у сукупності дають досить повне представлення про зв'язок шорсткості й оптичних характеристик поверхні, дозволяють обґрунтовано підійти до вибору оптимальних методів і умов обробки світло відбиваючих поверхонь.

У роботі отримана оцінка рішення рівняння теплопровідності для одномірного нестационарного температурного поля, формованого в довгомірному трубчастому елементі, виготовленому з тонкої пружної стрічки і працюючому в умовах впливу світлового потоку [7]. Розрахунками встановлено, що, змінюючи шорсткість і відповідно оптичні характеристики поверхні, з'являється можливість зменшення температури нагрівання довгомірного трубчастого елемента. Поряд із традиційними підходами (вибір геометричних розмірів перетину трубчастого елемента і теплофізичних характеристик застосовуваних матеріалів), це створює додаткові резерви підвищення його експлуатаційних властивостей (зниження нерівномірності нагрівання і теплового вигину). Розрахунками також установлений значний вплив на величину теплового вигину довгомірного трубчастого елемента поглинальної здатності поверхні, коефіцієнтів теплопровідності і теплового лінійного розширення матеріалу.



а



б

Рис. 3. Відносні опорні криві поверхонь зразків з алюмінієвого сплаву АМг4 після різних методів обробки (а): 1- прокату (вихідна поверхня); 2 - гідроабразивної; 3 - точіння; 4 - фрезерування; 5 - абразивного полірування; 6 – точіння алмазом, та вид спрощеної функції  $L(\bar{y})$  (б).

У роботі експериментально встановлено зв'язок шорсткості й оптичних характеристик світловідбиваючих поверхонь деталей із тонкого листа і стрічок для різних методів механічної і фізико-технічної обробки. Виходячи з даних табл. 2, зменшення відношення параметрів шорсткості  $R_a/R_{max}$  (обумовлене різними методами обробки) відповідає збільшенню критерію шорсткості  $F'$ , коефіцієнта відбиття світла  $\rho_s$  і зменшенню коефіцієнтів поглинання  $A_s$  і випромінювання  $\varepsilon$ . При цьому відношення  $R_a/R_{max}$  приймає досить малі значення (0,033 для абразивного полірування), відповідно  $R_{max}/R_a$  приймає відносно великі значення – 30,3. Це добре погоджується з отриманими теоретичними результатами, зокрема, приведеними в табл. 1, згідно яким відношення  $R_a/R_{max}$  може змінюватися в межах 0...0,29. З фізичної точки зору відносно великі значення  $R_{max}/R_a$  при абразивному поліруванні обумовлені формою відносної опорної довжини профілю поверхні  $t_p$  (рис. 3,а, крива 5), встановленою експериментально.

Таблиця 2

Значення параметрів шорсткості й оптичних характеристик поверхонь зразків із прокату алюмінієвого сплаву АМг4, оброблених різними методами

Метод обробки	$R_a$ , мкм	$\frac{R_a}{R_{max}}$	Критерій шорсткості $F'$	Коефіцієнти			$\frac{A_s}{\varepsilon}$	КРП, мВ
				відбиття світла $\rho_s$	поглинання $A_s$	випромінювання $\varepsilon$		
Вихідна поверхня (прокат)	0,35	0,104	0,896	0,4	0,6	0,16	3,75	890
Фрезерування	1,6	0,11	0,89	0,47	0,53	0,15	3,53	100
Струйно-абразивна	0,9	0,16	0,84	0,4	0,6	0,3	3,75	260
Точіння	0,56	0,09	0,91	0,48	0,52	0,07	1,42	1050
Вигладжування кулею	0,1	0,07	0,93	0,8	0,2	0,05	4,0	1020
Абразивне полірування	0,1	0,033	0,967	0,75	0,25	0,06	4,16	120
Тонке точіння алмазним інструментом	0,1	0,047	0,953	0,87	0,13	0,07	1,36	1200

Шкала  $p(\%)$  визначає відношення поточної висоти нерівностей до максимальної висоти нерівностей  $R_{max}$ , тобто значення  $p=0\%$  відповідає положенню вершини найбільшої мікронерівності, а значення  $p=100\%$  - положенню найбільшої западини.

Більш плавна зміна значень  $t_p$  зі зміною  $p$  (криві 1, 2, 3 і 4) указує на більш рівномірний розподіл висот вершин мікронерівностей по профілю поверхні. Для абразивного полірування (крива 5) характерний нерівномірний розподіл висот нерівностей. Очевидно, у діапазоні  $p=50...56\%$  їх значно більше (90%, або більше), чим у діапазонах  $p=0...50\%$  і  $p=56...100\%$ . Причому, у діапазоні  $p=0...50\%$  їх більше, ніж у діапазоні  $p=56...100\%$ . Це свідчить про те, що в діапазон  $p=56...100\%$  попадають лише окремі мікронерівності (риски, подряпини), утворені окремими гострими крайками абразивних зерен. Якщо представити  $t_p$  у формі функції  $L(\bar{y})$  рис.1, то прийдемо до наступного спрощеного графіка (рис 3,б). Відмінність цього графіка функції  $L(\bar{y})$  складається в наявності додаткової ділянки  $L_1...1$  на рис 3,б, обумовленої появою окремих глибоких рисок та подряпин на обробленій поверхні. Це приводить до додаткового збільшення параметра шорсткості  $R_{max}$  і відповідно до збільшення відношення  $R_{max}/R_a$ . Чим менше безрозмірна величина  $L_0$  і більше аналогічна безрозмірна величина  $L_1 \rightarrow 1$ , тим, мабуть, більше відношення  $R_{max}/R_a$ , що в ідеалі прагне до нескінченності. З цього випливає, що відношення  $R_{max}/R_a$  може змінюватися у великих межах, значно перевищуючі значення 5, 10 і більше. Це залежить від форми відносної опорної довжини профілю  $t_p$ . Цим доведено вірогідність розробленої математичної моделі формування шорсткості поверхні при абразивній обробці, а також те, що за допомогою відношення  $R_{max}/R_a$  (або відношення  $R_a/R_{max}$ ) можна аналізувати оптичні характеристики поверхонь, оброблених різними методами. Параметри шорсткості  $R_a$ ,  $R_z$  і  $R_{max}$ , як встановлено багаторазовими експериментальними дослідженнями, неоднозначно впливають на оптичні характеристики оброблених поверхонь. Отже, формування оптичних характеристик поверхонь зв'язано з формою мікронерівностей поверхні, яка визначається відношенням  $R_a/R_{max}$ , а не з висотою її профілю шорсткості.

Експериментально встановлено (табл. 2), що найбільші значення коефіцієнта відбиття світла поверхнею  $\rho_s$  досягаються після тонкого точіння алмазним інструментом, вигладжування кулею й абразивним поліруванням. Ці методи обробки також забезпечують найменші значення параметрів шорсткості  $R_a$ ,  $R_a/R_{max}$  і найбільші значення критерію шорсткості  $F'$ . З цього випливає, що для створення високо світловідбиваючих поверхонь (при забезпеченні дзеркального характеру відбиття світла) жорстких деталей з алюмінієвих і мідних сплавів більш ефективно застосовувати методи алмазного точіння і вигладжування, а для деталей з тонкого листа і стрічок – абразивне полірування, що дозволяє зменшити силову напруженість процесу обробки. Для створення світловідбиваючих матових поверхонь (при забезпеченні дифузійного характеру відбиття світла, для якого відношення  $A_s/\varepsilon$  приймає відносно невеликі значення) ефективно застосовувати процеси фрезерування і струйно-абразивну обробку, табл. 2.

У роботі для опису і контролю фізико-хімічного стану оброблених поверхонь

використана методика оцінки роботи виходу електронів за значеннями величини контактної різниці потенціалів (КРП). Показано, що оцінка роботи виходу електронів і критерій шорсткості поверхні (а також і відношення  $R_a/R_{max}$ ) можуть бути використані для опису і контролю фізико-хімічного стану оброблених поверхонь, оскільки максимальним значенням критерію шорсткості відповідають максимальні значення КРП (табл. 2), а мінімальні значення КРП відповідають забрудненому або окисленому поверхневому шару.

У роботі проведений комплекс експериментальних досліджень формування шорсткості й оптичних характеристик поверхонь при абразивному і електрохімічному поліруванні. Експериментально встановлено, що зменшити коефіцієнт поглинання поверхні  $A_s$  при абразивному поліруванні можна за рахунок застосування алмазної пасти АСМ 2/1 (табл. 3). Доведено, що спочатку, при абразивному поліруванні досягається видалення окисної плівки і згладжування поверхневого шару. Застосування наступної електрохімічної обробки додає поверхні властивості високої відбивної здатності і її стійкості при довгостроковому зберіганні за рахунок анодної обробки. Тому, для забезпечення заданих експлуатаційних властивостей деталей з тонколистового матеріалу запропоновано обробку здійснювати в дві операції: абразивного і електрохімічного полірування.

Таблиця 3

Значення критерію шорсткості  $F'$  і коефіцієнта поглинання  $A_s$  поверхонь стрічок сплаву 36НХТЮ після абразивного полірування

Абразивна паста	$A_s$ (експеримент)	$F'$	$A_s$ (розрахунок)
АСМ 2/1	0,38	0,93	0,380
АСМ 1/0	0,39	0,91	0,382
Окис алюмінію М3	0,42	0,89	0,394
Окис хрому М3	0,43	0,89	0,394
Електрокорунд М7	0,46	0,88	0,399

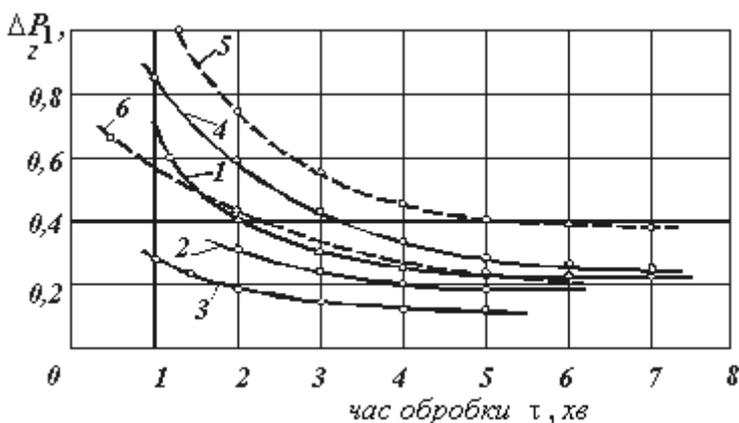


Рис. 4. Залежність маси знятого металу від часу обробки алмазною суспензією різної зернистості: 1 – АСМ 7/5 після шліфування; 2 – АСМ 5/3, після обробки -АСМ 7/5; 3 – АСМ 3/2, після обробки – АСМ 5/3; 4 – АСМ 7/5, після обробки – АСМ 3/2; 5 – АСМ 7/5 після шліфування (суспензія з полімером); 6 – АСМ 5/3, після обробки – АСМ 7/5 (суспензія з полімером).

Розроблено математичні моделі абразивного і електрохімічного полірування на основі багатофакторного планування експерименту, які дозволили визначити оптимальні параметри обробки світловідбивних поверхонь. На основі отриманої емпіричної залежності:

$$F' = 0,7638 V^{0,0372} \cdot p^{0,0151} \cdot \tau^{0,0245}, \quad (6)$$

(де  $V$  – окружна швидкість повстяного полірувальника, м/с;  $p$  – тиск, МПа;  $\tau$  – час обробки, с), визначено оптимальні умови обробки при абразивному поліруванні:  $V=30$  м/с;  $p = 200$  кПа;

$\tau = 15$  с.

Експериментально встановлено, що введення полімеру в абразивний порошок позитивно позначається на збільшенні знімання матеріалу за рахунок хімічної дії на оброблювальну поверхню (рис. 4) [8]. Велика продуктивність досягається при обробці абразивними пастами з великим розміром зерен. Введення полімеру в абразивні пасти збільшує згладжування поверхні. На цій основі розроблена і захищена авторським посвідченням на винахід ефективна абразивна суспензія: 5–8% алмазного мікропорошку, 5–7% полівінілацетатної дисперсії, а інше – дистильована вода. Полівінілацетатна дисперсія при оптимальному її змісті в складі забезпечує фіксацію зерен на полірувальнику.

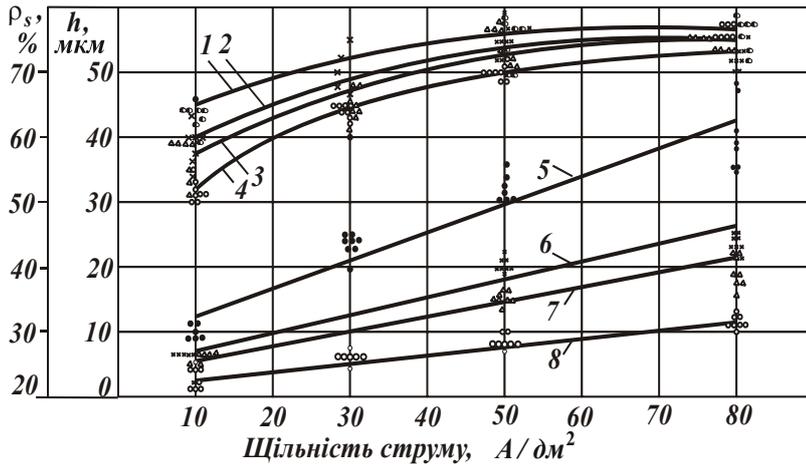


Рис. 5 Залежність відбивної здатності  $\rho_s$  і товщини шару матеріалу, що знімається  $h$ , при електрохімічному поліруванні стрічки із сплаву 36НХТЮ від щільності струму: 1, 2, 3, 4 -  $\rho_s$  при температурі електроліту 70, 50, 30, 100<sup>0</sup> С відповідно; 5, 6, 7, 8 -  $h$  при температурі електроліту 100, 70, 50, 30<sup>0</sup> С відповідно; час обробки – 1 хв; склад електроліту:  $\text{H}_3\text{PO}_4$  – 60%,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  – 20%,  $\text{H}_2\text{O}$  – 20%.

електрохімічному поліруванні відбувається поліпшення механічних характеристик оброблюваних хромонікелевих і мідно-берилієвих сплавів. Доведено, що здійснення електрохімічного полірування електроконтактним способом переважніше ванного способу за рахунок активації відновлення, зняття прианодного шару. На цій основі розроблено і захищено авторським посвідченням на винахід пристрій для електроконтактного полірування довгомірних трубчастих елементів із пружинних стрічок, визначені оптимальні умови електрохімічного полірування поверхонь деталей із стрічок сплавів марок 36НХТЮ і БрБНТ 1,7.

У роботі проведений комплекс експериментальних досліджень по створенню світловідбивних поверхонь (при забезпеченні дифузійного характеру відбиття світла) шляхом нанесення покриттів електрохімічним засобом, а також хімічним і електрохімічним травленням. Такі поверхні характеризуються відносно невеликими значеннями відношення коефіцієнтів поглинання і випромінювання ( $A_s / \varepsilon$ ). Для цього на зразках з листового прокату (зі сплавів АМг3, АМг6, Д16, ВТ6, ВТ14, ВТ20) одержували покриття хромом і нікелем (товщиною 0,3 мкм), окисдуванням і аноди-

Експериментально встановлено, що застосування електрохімічного полірування дозволяє підвищити відбивну здатність оброблених поверхонь у середньому від 60 до 75%, рис. 5. Це досягається за рахунок збільшення щільності струму до 70А/дм<sup>2</sup> і температури електроліту до 70<sup>0</sup>С. Великим значенням щільності струму і температури електроліту (у межах 30–100<sup>0</sup>С) відповідають великі значення товщини шару матеріалу, що знімається, рис. 5. Встановлено також, що зі збільшенням часу обробки коефіцієнт поглинання поверхні  $A_s$  зменшується, більш інтенсивно в межах 60с. При абразивному й

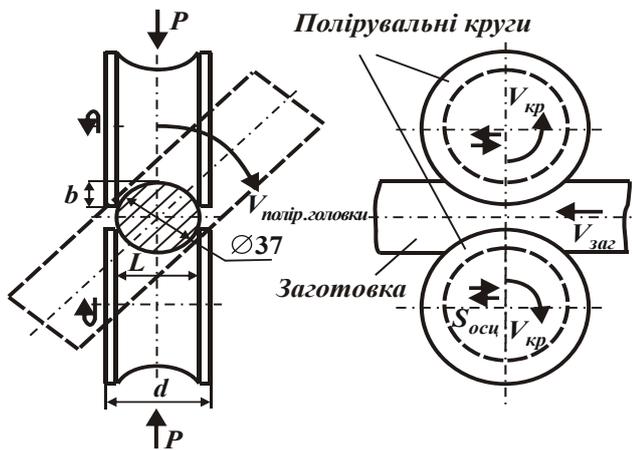


Рис. 6. Схема полірування трубчастих елементів із пружних стрічок на спеціальній оправці.

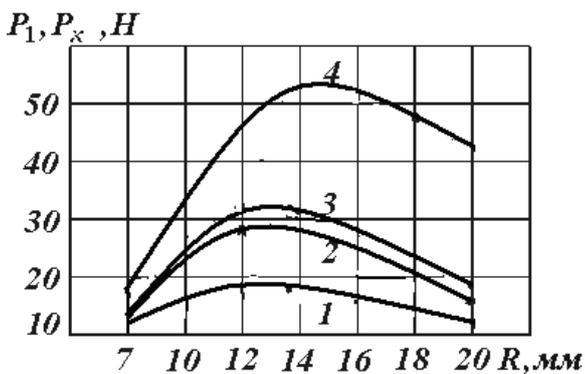


Рис. 7. Вплив радіуса трубчастої заготовки і її товщини на значення критичної сили стиску  $P_{кр}$  (ширина розгортки 50 мм): 1, 2 -  $P_x$  при товщині стрічки 0,15 і 0,2 мм; 3 и 4 – сила  $P_1$  при товщині стрічки 0,15 і 0,2 мм відповідно.

довжньої сили стиску стрічки:  $P_x$  і  $P_1$ , які визначають появу вигинової або вигиново-крутильної форми втрати стійкості

$$P_x = \frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot EI_x}{l}; P_1 = \frac{1}{2 \left( 1 - \frac{a_y^2}{r_p^2} \right)} \left[ P_y + P_\omega - \sqrt{(P_y + P_\omega)^2 - 4P_y P_\omega \left( 1 - \frac{a_y^2}{r_p^2} \right)} \right], \quad (7)$$

де  $P_y = \frac{n^2 \pi^2 EI_y}{l^2}$ ;  $P_\omega = \frac{1}{r_p^2} \left( \frac{n^2 \pi^2 EI_\omega}{l^2} + GI_k \right)$ ;  $E$  – модуль пружності, Н/м<sup>2</sup>;  $G$  – жорсткість при закручуванні, Н/мм<sup>2</sup>;  $I_x, I_y, I_\omega, I_k$  – головні центральні моменти інерції,

руванням (товщиною до 30 мкм) [9]. Анодування проводили в сірнокислотному розчині при кімнатній температурі і щільності струму 1–1,5 А/дм<sup>2</sup>. Експериментально встановлено, що найменші значення відношення  $A_s / \varepsilon$  для анодуваних поверхонь досягаються при наповненні у воді і хромпіку зразків у стані постачання: – для сплаву АМг6:  $A_s / \varepsilon = 0,27$  (у воді); 0,24 (у хромпіку); – для сплаву Д16:  $A_s / \varepsilon = 0,2$  (у воді); 0,22 (у хромпіку).

На основі приведених досліджень розроблені ефективні технології фініш-

ної обробки світловідбивних поверхонь деталей з тонкого листа і стрічок (довгомірних трубчастих елементів, деталей термостата) [10]. Запропоновано планетарну схему абразивного полірування трубчастих елементів довжиною 25м і більше, виготовлених зі стрічки товщиною 0,15 мм, рис. 6. Відношення швидкості обертання полірувальних кругів навколо своєї осі до швидкості обертання полірувальної головки навколо осі трубчастого елемента складає 25:1. Зі збільшенням тиску на деталь повсталих полірувальних кругів можлива втрата стійкості крайок стрічки. Тому, для вибору оптимальних режимів різання розроблена аналітична модель стійкості тонкостінної деталі (трубчастого елемента) при абразивному поліруванні, що дозволила визначити граничні значення параметрів режимів різання, при яких сила різання досягає критичного значення, обумовленого втратою стійкості пружної стрічки. Отримано аналітичні залежності для розрахунку двох значень по-

секторальний момент інерції та момент інерції при закручуванні відповідно,  $\text{мм}^4$ ;  $a_y$  – координата центру вигину,  $\text{мм}$ ;  $r_p$  – полярний радіус інерції поперечного перетину,  $\text{мм}$ ;  $l$  – координата точки прикладання сили по осі  $Z$ ,  $\text{мм}$ ;  $n$  – ціле позитивне число (1, 2, 3...).

Розрахункове значення критичної сили  $P_{кр}$  визначається як найменше з двох значень  $P_x$  і  $P_1$ . Установлено, що якщо  $P_x < P_1$ , то раніш виникає вигинова форма втрати стійкості (вигин у площині симетрії); якщо ж  $P_x > P_1$ , то раніш настає вигиново-крутильна форма втрати стійкості (вигин із площини симетрії, супроводжуваний закручуванням перетинів). Для перевірки на стійкість і визначення інтервалів варіювання значень окружних швидкостей і тиску інструмента були прийняті геометричні розміри перетинів заготовок зі стрічки 0,15x50  $\text{мм}$  і 0,20x50  $\text{мм}$  із радіусом кільцевого перетину 7, 12, 14 і 20  $\text{мм}$  (матеріал – сплав марки 36НХТЮ). Результати обчислення критичної подовжньої сили стиску стрічки трубчастої заготовки при обробці представлені на рис. 7, з якого видно, що при товщині стрічки 0,15  $\text{мм}$  величина сили стиску не повинна перевищувати 18  $\text{Н}$  ( $R=14$   $\text{мм}$ ) і 11  $\text{Н}$  ( $R=20$   $\text{мм}$ ) для заготовки 0,15x50  $\text{мм}$ . Втрата стійкості трубчастої заготовки відбувається в вигиновій формі. З урахуванням цього для абразивного полірування поверхонь трубчастих заготовок з тонких пружних стрічок хромонікелевих і мідно-берилієвих сплавів рекомендується режим обробки: окружна швидкість повстяних полірувальників з алмазною пастою АСМ 2/1 – 30  $\text{м/с}$ , питомий тиск інструмента до 500  $\text{кПа}$ .

На основі проведених досліджень запропонований маршрут виготовлення довгомірних трубчастих елементів з мідно-берилієвих сплавів марки БрБНТ 1,7 (1,9), що включає формоутворення і термічну обробку, абразивне й електрохімічне полірування замість металізації алюмінієм у вакуумі. Для обробки довгомірних трубчастих елементів розроблене і виготовлене спеціальне обладнання: установки термічної, абразивної й електрохімічної обробки, спеціальні оправлення, пристрої зварювальні, для перемотування трубчастих елементів із пружних стрічок, нанесення покриття і виготовлення отворів, електролізери, системи електроживлення, знежирення, холодного і гарячого промивання, нейтралізації, циркуляції й охолодження робочих розчинів і сушіння поверхонь, спеціальні інструменти. Технологічне устаткування дозволяє регулювати параметри режиму обробки в наступних межах: при термічній обробці швидкість переміщення заготовки (0,0001...0,01)  $\text{м/с}$  (тривалість термічної обробки відповідно (18000...180)с), температура нагрівання (500...700)  $\text{К}$ ; при абразивному поліруванні окружна швидкість полірувальника (20...100)  $\text{м/с}$ , питомий тиск до 500  $\text{кПа}$ ; при електрохімічному поліруванні швидкість переміщення заготовки (0,0002...0,003)  $\text{м/с}$  (відповідає тривалості обробки відповідно (900...6) с, щільність струму до  $2,5 \cdot 10^2$   $\text{А/дм}^2$  при напрузі 24В (фосфорнохромовий електроліт); при нанесенні покриття швидкість переміщення оброблюваної стрічки (0,0001...0,002)  $\text{м/с}$ , температура в сушильній камері (370...470)  $\text{К}$ .

Експериментально визначені оптимальні режими обробки: при формоутворенні трубчастої заготовки – нагрів в середовищі аргону і витримка при температурі 640  $\text{К}$  протягом 40 хв; наступне абразивне полірування алмазною пастою АСМ 2/1 при окружній швидкості полірувальника 25  $\text{м/с}$ , тиску 200  $\text{кПа}$  і часу обробки 10 с; електрохімічне полірування протягом 15 с при щільності струму  $0,5 \cdot 10^6$   $\text{А/м}^2$  (фосфорно-хромовий електроліт).

Розроблена технологія впроваджена на ряді підприємств. На спеціальному устаткуванні була виготовлена партія довгомірних трубчастих елементів діаметром 0,024 м з поліпшеними експлуатаційними характеристиками, коефіцієнти поглинання і випромінювання поверхонь знаходилися в межах 0,22..0,25 і 0,09...0,06 відповідно. Механічні характеристики деталей із сплаву марки БрБНТ 1,7 мали наступні значення: тимчасовий опір розривові  $\sigma_s = 1,23 \cdot 10^3$  Па; границя текучості  $\sigma_m = 1,13 \cdot 10^3$  Па; відносне подовження  $\delta = 2,5\%$ . Установлено, що розроблена технологія більш економічна в порівнянні з існуючою технологією обробки довгомірних трубчастих елементів зі сплаву 36НХТЮ.

Результати досліджень були використані при впровадженні технології електрохімічного полірування стрічок зі сплаву марки Мнц15-20 для контактів реле на Харківському виробничому об'єднанні «Радіореле»: розроблена технічна документація і виготовлені дві установки для електрохімічного полірування нескінчених стрічок.

Розроблена також нова технологія фінішної обробки деталей термостата з тонколистових матеріалів, що забезпечує створення світлорозсіюючих поверхонь. Кінематика процесу заснована на обкатуванні поверхні спеціальним еластичним абразивним інструментом, у результаті чого досягається матування поверхні з заданими оптичними характеристиками. Розроблено конструкції і виготовлені зразки пелюсткових кругів і іглофрез. Технологія впроваджена на Харківському заводі транспортного устаткування. Результати досліджень автора були використані також на Харківському верстатобудівному заводі ім. Косіора при розробці технології електрохімічної обробки світлорозсіюючих поверхонь для інформаційних панелей.

**Література:** 1. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технология машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.10. “Концепции развития технологии машиностроения”. – Одесса: ОНПУ, 2005. – 565 с. 2. Шкурупий В.Г., Новиков Ф.В. Аналитическое описание и технологическое обеспечение параметров шероховатости обработки // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2004. – Вып. 67. – С. 46-56. 3. Новиков Ф.В., Шкурупий В.Г. Исследования шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке методами теории вероятности // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПИ”, 2004. – № 44. – С. 140-149. 4. Новиков Ф.В., Шкурупий В.Г. Теоретические и экспериментальные исследования шероховатости обработанной поверхности // Труды 9-й Международной научно-технической конференции. Физические и компьютерные технологии. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2004. – С. 11-15. 5. Новиков Ф.В., Шкурупий В.Г. Установление функциональных связей между параметрами шероховатости и оптическими характеристиками обработанной поверхности // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2005. – Вып. 68. – С. 312-318. 6. Шкурупий В.Г. Особенности анализа шероховатости поверхности, обработанной резанием // Резание и инструмент. – Харьков, 1982. – Вып.27. – С. 74-77. 7. Новиков Ф.В., Шкурупий В.Г. Обоснование связи геометрических характеристик светоотражающих поверхностей штанг с отверстиями с их эксплуатационными свойствами // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. – Харків: ХНТУСГ, 2005. – Вып. 33. – С. 294-301. 8. А.с. 905256 СССР МКИ С 09 К 3/14. Доводочный алмазно-абразивный состав /П.Д. Дудко, Ю.Ф. Назаров, В.Г. Шкурупий, В.С. Коваленко, В.М. Рубан, А.И. Соловьев. – № 2861281/23-26; Заявл. 03.12.79; Опубл. 15.02.82. Бюл. № 6. – 4с. 9. А.с. 478067 СССР МКИ С 23в 5/68. Устройство для гальванической обработки электроконтактным методом /П.Д.Дудко, Ю.Ф. Назаров, Д.А. Стороженко, В.Г. Шкурупий, О.С. Кирзунов.- № 1977546/22-1; Заявл. 20.12.73; Опубл. 25.07.75. Бюл. №27. – 3 с. 10. Шкурупий В.Г., Шкурупий Ю.В. Финишная обработка поверхностей тонкостенных деталей // Авиационно-космическая техника и технологии. Труды Государственного аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”. – Харьков, 2000. – Вып. 14. – С. 259-261.

## МЕХАНИКА ФОРМИРОВАНИЯ УПРУГИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПРИ ЛЕЗВИЙНОЙ И АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

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

*Results of mathematical modelling of conditions of formation of elastic movings are resulted at machining.*

В наших работах [1–6] предложен теоретический подход к расчету и анализу упругих перемещений при механической обработке, позволивший решить ряд важных задач, связанных с повышением производительности, точности и качества обработки. Настоящая работа является дальнейшим развитием теоретического подхода. Рассмотрим его суть.

При многопроходной обработке, например, при продольном точении, линейный сьем материала  $\Delta$  определяется:

$$\Delta = n \cdot t - y, \quad (1)$$

где  $n = \tau / \tau_0$  – текущее число проходов;  $\tau$  – текущее время, с;  $\tau_0 = l_{\text{дет}} / S_{\text{прод}}$  – время одного прохода, с;  $l_{\text{дет}}$  – длина обрабатываемой цилиндрической детали, м;  $S_{\text{прод}}$  – скорость продольной подачи, м/с;  $t$  – глубина резания, м;  $y = \frac{\sigma}{K_{\text{рез}}} \cdot \frac{Q}{V_{\text{рез}}} \cdot \frac{1}{c}$  –

величина упругого перемещения, м;  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $K_{\text{рез}} = P_z / P_y$  – коэффициент резания;  $P_z, P_y$  – соответственно тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н;  $Q = \pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot t_{\text{ф}} \cdot V_{\text{рез}}$  – фактическая производительность обработки при продольном точении, м<sup>3</sup>/с;  $D_{\text{дет}}$  – диаметр обрабатываемой детали, м;  $t_{\text{ф}}$  – фактическая глубина резания, м;  $V_{\text{рез}}$  – скорость резания, м/с;  $c$  – приведенная жесткость технологической системы, Н/м.

С учетом зависимости  $\Delta = v / (\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot l_{\text{дет}})$  и текущей производительности обработки  $Q = dv / d\tau$  уравнение (1) примет вид дифференциального уравнения первого порядка [1]:

$$\frac{dv}{d\tau} + M \cdot v = N \cdot \tau, \quad (2)$$

где  $M = \frac{V_{\text{рез}} \cdot K_{\text{рез}} \cdot c}{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot l_{\text{дет}} \cdot \sigma}$ ;  $N = \frac{V_{\text{рез}}^2 \cdot K_{\text{рез}} \cdot c \cdot t}{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot \sigma}$ ;  $v$  – объем снятого материала, м<sup>3</sup>.

На основе решения уравнения (2) установлены зависимости для определения производительности обработки  $Q$ , упругого перемещения в технологической системе  $y$  и радиальной составляющей силы резания  $P_y = c \cdot y$ :

$$Q = Q_0 - \left( Q_0 - \frac{y_0 \cdot V_{\text{рез}} \cdot K_{\text{рез}} \cdot c}{\sigma} \right) \cdot e^{-\frac{V_{\text{рез}} \cdot K_{\text{рез}} \cdot c \cdot \tau}{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot l_{\text{дет}} \cdot \sigma}}, \quad (3)$$

$$y = \frac{\sigma \cdot Q_0}{V_{\text{рез}} \cdot K_{\text{рез}} \cdot c} - \left( \frac{\sigma \cdot Q_0}{V_{\text{рез}} \cdot K_{\text{рез}} \cdot c} - y_0 \right) \cdot e^{-\frac{V_{\text{рез}} \cdot K_{\text{рез}} \cdot c \cdot \tau}{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot l_{\text{дет}} \cdot \sigma}}. \quad (4)$$

$$P_y = \frac{\sigma \cdot Q_0}{V_{рез} \cdot K_{рез}} - \left( \frac{\sigma \cdot Q_0}{V_{рез} \cdot K_{рез}} - c \cdot y_0 \right) \cdot e^{-\frac{V_{рез} \cdot K_{рез} \cdot c \cdot \tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma}}, \quad (5)$$

где  $Q_0 = \pi \cdot D_{дет} \cdot t \cdot V_{рез}$  – номинальная производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $y_0$  – начальный натяг в технологической системе, м.

С учетом обозначений:

$$y_{уст} = \frac{\sigma \cdot Q_0}{V_{рез} \cdot K_{рез} \cdot c}, \quad \bar{\beta} = \frac{V_{рез} \cdot K_{рез} \cdot c}{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma} = \frac{V_{рез} \cdot K_{рез} \cdot c}{F \cdot \sigma}$$

(где  $F = \pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет}$  – площадь обрабатываемой поверхности детали, м<sup>2</sup>) зависимости (3), (4) и (5) примут более простой вид:

$$Q = Q_0 - \left( Q_0 - \frac{y_0 \cdot V_{рез} \cdot K_{рез} \cdot c}{\sigma} \right) \cdot e^{(-\bar{\beta} \cdot \tau)}, \quad (6)$$

$$y = y_{уст} - (y_{уст} - y_0) \cdot e^{(-\bar{\beta} \cdot \tau)}, \quad (7)$$

$$P_y = c \cdot y_{уст} - c \cdot (y_{уст} - y_0) \cdot e^{(-\bar{\beta} \cdot \tau)}. \quad (8)$$

Как следует из рис. 1 [3], построенного на основе зависимостей (6), (7) и (8),

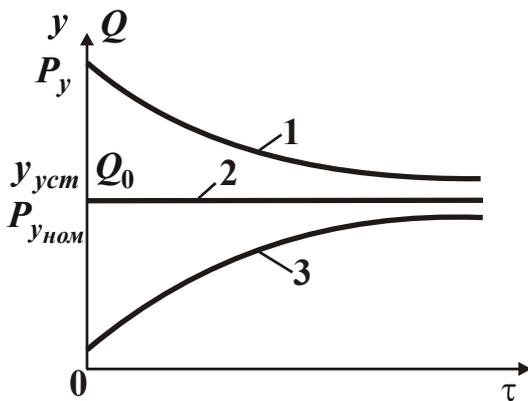


Рис. 1. Зависимости производительности обработки  $Q$ , величины упругого перемещения  $y$  и радиальной составляющей силы резания  $P_y$  от времени обработки  $\tau$ : 1 -  $y_0 > y_{уст}$ ; 2 -  $y_0 = y_{уст}$ ; 3 -  $y_0 < y_{уст}$ .

характер изменения параметров  $Q$ ,  $y$  и  $P_y$  с течением времени обработки  $\tau$  может быть самым разнообразным. Все зависит от соотношения параметров  $y_{уст}$  и  $y_0$ . При условии  $y_{уст} > y_0$  параметры  $Q$ ,  $y$  и  $P_y$  увеличиваются во времени, асимптотически приближаясь соответственно к значениям:  $Q_0$ ,  $y_{уст}$  и  $P_{уном}$ . При условии  $y_{уст} = y_0$  параметры  $Q$ ,  $y$  и  $P_y$  остаются неизменными с течением времени обработки и принимают соответственно значения  $Q_0$ ,  $y_{уст}$  и  $P_{уном}$ . При условии  $y_{уст} < y_0$  параметры  $Q$ ,  $y$  и  $P_y$  уменьшаются с течением времени обработки, асимптотически приближаясь соответственно к значениям  $Q_0$ ,  $y_{уст}$  и  $P_{уном}$ .

Исходя из этого, все применяемые на практике схемы механической обработки можно классифицировать по признаку изменения радиальной составляющей силы резания  $P_y$  во времени:

- 1) схемы, характеризующиеся увеличением  $P_y$  с течением времени обработки (основанные на жесткой схеме обработки);
- 2) схемы, характеризующиеся постоянством  $P_y$  с течением времени обработки (основанные на упругой схеме обработки с фиксированным радиальным усилием);
- 3) схемы, характеризующиеся уменьшением  $P_y$  с течением времени обра-

ботки (основанные на упругой схеме обработки с начальным натягом в технологической системе).

Случай 1 реализуется на практике при механической обработке как лезвийными, так и абразивными инструментами, а случаи 2 и 3 – при механической обработке абразивными инструментами (так называемые упругие схемы шлифования и доводки, а также схема выхаживания – обработка с отключенной радиальной подачей станка).

Из зависимости (4) следует, что добиться существенного уменьшения параметра  $y$  (повышения точности обработки) можно за счет выполнения условия  $y_0 > y_{уст} = 0$ , т.е. производя обработку по упругой схеме с начальным натягом в технологической системе  $y_0$ . При этом (рис. 1) обеспечивается наибольшая производительность обработки  $Q$ . Причем, с увеличением величины  $y_0$  производительность обработки  $Q$  увеличивается.

Очевидно, чем выше режущая способность инструмента (больше коэффициент резания  $K_{рез}$  и меньше условное напряжение резания  $\sigma$ ), тем больше величина  $y_0$  и соответственно производительность обработки  $Q$ .

В наших работах [1–6] проведен подробный анализ зависимостей (3), (4), (5) и выявлен ряд новых решений. Поэтому представляется важным дальнейшее исследование уравнения (2) и зависимостей (3), (4), (5). Учитывая определенные сложности математических преобразований данных зависимостей, в связи с наличием в них экспоненциальной функции, получим упрощенное решение уравнения (2). В первом приближении рассмотрим  $v = Q \cdot \tau$  и  $Q = dv / d\tau$ . Это позволит перейти от дифференциального уравнения (2) к простому линейному алгебраическому уравнению:

$$Q + M \cdot Q \cdot \tau = N \cdot \tau. \quad (9)$$

Его решение:

$$Q = \frac{N}{\left(\frac{1}{\tau} + M\right)} = \frac{Q_0}{\left(1 + \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{рез} \cdot V_{рез}} \cdot \frac{1}{\tau}\right)} = \frac{Q_0}{\left(1 + \frac{1}{\beta \cdot \tau}\right)}. \quad (10)$$

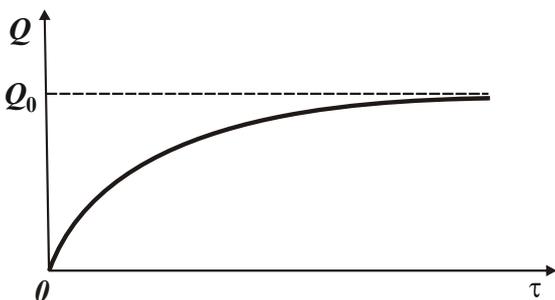


Рис. 2. Зависимость фактической производительности обработки  $Q$  от времени обработки  $\tau$ .

Зависимость (6) при  $y_0 = 0$  принимает вид

$$Q = Q_0 \cdot \left[1 - e^{(-\beta \cdot \tau)}\right]. \quad (11)$$

Сравнивая зависимости (10) и (11), видно, что они изменяются по одному закону, рис. 2. Следовательно, для выполнения упрощенных расчетов можно использовать зависимость (10).

Упругое перемещение  $y$  с учетом зависимости (10) определится:

$$y = \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot \frac{Q}{V_{рез}} \cdot \frac{1}{c} = \frac{Q_0}{\left(\frac{V_{рез} \cdot K_{рез} \cdot c}{\sigma} + \frac{F}{\tau}\right)} = \frac{y_{уст}}{\left(1 + \frac{1}{\beta \cdot \tau}\right)}. \quad (12)$$

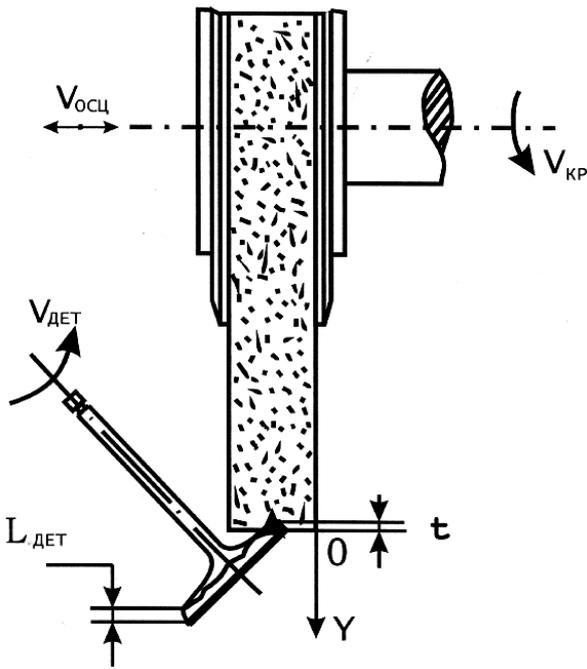


Рис. 3. Расчетная схема шлифования.

Зависимости (12) и (10) фактически идентичны, т.е. величина упругого перемещения  $y$  изменяется по закону изменения производительности обработки  $Q$ . Преобразуем уравнение (9), выражая в нем производительность обработки  $Q$  через величину упругого перемещения  $y$ :

$$\frac{Q_0}{F} \cdot \tau = \frac{Q}{F} \cdot \tau + y. \quad (13)$$

Уравнение (13) является математическим выражением баланса упругих перемещений в технологической системе. Оно справедливо как для продольного, так и радиального точения (или шлифования, рис. 3 [1]). В последнем случае  $V_0 = Q_0 / F$  – номинальная скорость радиальной подачи, м/с;  $V_\phi = Q / F$  – фактическая скорость радиальной подачи, м/с.

Уравнение (13) справедливо для условия  $y_0 = 0$ , т.е. нулевого начального натяга в технологической системе. При  $y_0 > 0$  уравнение (13) необходимо рассматривать в виде:

$$y_0 + V_0 \cdot \tau = V_\phi \cdot \tau + y. \quad (14)$$

При обработке без радиальной подачи ( $V_0 = 0$ ), т.е. при выхаживании, уравнение (14) примет вид:

$$y_0 = V_\phi \cdot \tau + y. \quad (15)$$

Разрешим уравнение (14) относительно  $Q = F \cdot V_\phi$ :

$$Q = \frac{\left( Q_0 + y_0 \cdot \frac{F}{\tau} \right)}{\left( 1 + \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{рез} \cdot V \cdot \tau} \right)} = Q_0 \cdot \frac{\left( 1 + \frac{y_0 \cdot F}{Q_0 \cdot \tau} \right)}{\left( 1 + \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{рез} \cdot V \cdot \tau} \right)}. \quad (16)$$

Величина упругого перемещения  $y$  с учетом зависимости  $y = \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot \frac{Q}{V_{рез}} \cdot \frac{1}{c}$

определится:

$$y = y_0 \cdot \frac{\left( 1 + \frac{Q_0 \cdot \tau}{y_0 \cdot F} \right)}{\left( 1 + \frac{c \cdot K_{рез} \cdot V \cdot \tau}{\sigma \cdot F} \right)}. \quad (17)$$

Характер изменения параметров  $Q$  и  $y$ , определяемых зависимостями (16) и (17), соответствует графикам, приведенным на рис. 1.

При  $Q_0 = 0 (V_0 = 0)$ , т.е. при выхаживании, зависимость (16) опишется:

$$Q = \frac{y_0}{\left( \frac{\sigma}{c \cdot K_{рез} \cdot V} + \frac{\tau}{F} \right)} = \frac{Q_0}{\left( 1 + \frac{c \cdot K_{рез} \cdot V \cdot \tau}{\sigma \cdot F} \right)} = \frac{Q_0}{(1 + \bar{\beta} \cdot \tau)} \quad (18)$$

Сравнивая зависимости (10) и (18), видно, что они отличаются лишь вторым слагаемым в знаменателе. Причем, это слагаемое определяется лишь одной величиной  $\bar{\beta}$ . В первом случае фактическая производительность обработки во времени увеличивается, во втором случае уменьшается. Из этого вытекает, что функции, описываемые зависимостями (10) и (18), являются противоположными, т.е. их сумма равна единице. С физической точки зрения это означает, что процесс резания по жесткой схеме, осуществляемой с непрерывной поперечной подачей и описываемый зависимостью (10), является противоположным процессу выхаживания, описываемому зависимостью (18). По длительности оба рассматриваемых процесса (этапа обработки) одинаковы, т.е. время, затрачиваемое на создание соответствующего

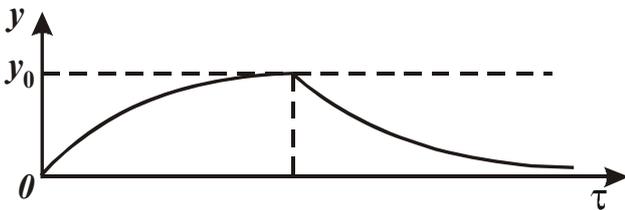


Рис. 3. Изменение величины  $y$  на этапах врезания и выхаживания.

натяга в технологической системе, равно времени на его устранение в процессе выхаживания, рис. 3.

Поскольку оба процесса математически взаимосвязаны, располагая данными об одном из них, можно расчетным путем установить характеристики второго процесса. К данному выводу можно прийти, рассматривая точное решение (6). При обработке без радиальной подачи, т.е. при выхаживании, решение (6) примет вид:

$$Q = \frac{y_0 \cdot V_{рез} \cdot K_{рез} \cdot c}{\sigma} \cdot e^{(-\bar{\beta} \cdot \tau)} = Q_0 \cdot e^{(-\bar{\beta} \cdot \tau)} \quad (19)$$

Этап врезания описывается зависимостью (11), а этап выхаживания – зависимостью (19). С увеличением времени обработки  $\tau$  производительность  $Q$ , определяемая зависимостью (11), увеличивается, а согласно зависимости (19) – уменьшается, причем, с одинаковой интенсивностью. Очевидно, что функции, описываемые зависимостями (11) и (19), являются противоположными. Таким образом, в работе приведены точное и приближенное решения о характере изменения параметров механической обработки с учетом упругих перемещений, возникающих в технологической системе, которые могут быть использованы для оптимизации и проектирования технологических процессов высокопроизводительной и высокоточной обработки.

**Литература:** 1. Новиков Г.В. Повышение эффективности алмазно-искрового шлифования деталей с высокопрочными покрытиями. – Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Одесса: ОПИ, 1990. – 16 с. 2. Якімов О.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В, Якімов О.О. Високопродуктивне шліфування: Навч. посібник. – К.: ІСДО, 1995. – 180 с. 3. 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. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технология машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.1. “Механика резания материалов”. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. 5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технология машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новико-

ва и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.7. “Точность обработки деталей машин”. – Одесса: ОНПУ, 2004. – 546 с. 6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технология машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.10. “Концепции развития технологии машиностроения”. – Одесса: ОНПУ, 2005. – 565 с.

**УДК 621.923**

## **РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

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

*The characteristic of the developed effective technology of finishing processing of products from firm alloys is given.*

Изделия из твердых сплавов цилиндрической формы широко применяются в машиностроении. Это втулки, инструменты для обработки материалов давлением и резанием (рейберы и т.д.). Широко используются специальные твердосплавные режущие инструменты, в особенности в авиационном производстве при изготовлении ответственных агрегатов и деталей из труднообрабатываемых материалов. Они отличаются от обычных (ГОСТовских) инструментов как конструктивным, так и технологическим исполнением. Как правило, имеют более сложную геометрическую форму рабочей (режущей) части, а требования к точности и шероховатости обработки рабочих поверхностей значительно выше. Например, шероховатость обработки наружных цилиндрических поверхностей специальных твердосплавных инструментов находится на уровне  $R_a = 0,1$  мкм, тогда как согласно действующим технологическим процессам обработки обычных многолезвийных твердосплавных инструментов шероховатость обработки больше 0,3 мкм.

Высокие требования к качеству обработки специальных твердосплавных инструментов усложняют технологический процесс их изготовления. В особой мере это относится к операциям круглого наружного шлифования, где стоит задача съема достаточно больших припусков (например, при обработке последней ступени многоступенчатого твердосплавного зенкера – до 10 мм) и одновременно обеспечения высоких требований по шероховатости и точности обрабатываемых поверхностей.

Как показывает опыт, решить данную задачу в рамках выполнения одной технологической операции – круглого наружного шлифования – не удастся. Для обеспечения высоких требований по качеству обработки приходится вводить дополнительные операции доводки свободным абразивом, которые характеризуются большой длительностью обработки и снижают эффективность технологических процессов изготовления указанных инструментов. Так, продолжительность операций круглого наружного шлифования составляет 1...5 мин при съеме припуска до 2 мм, а продолжительность операции доводки цилиндрических поверхностей твердосплавных режущих инструментов (с использованием алмазных паст) при съеме припуска 0,02 мм – от 3 до 12 мин и более. Операции доводки цилиндрических поверхностей инструментов осуществляются на доводочных бабках.

Поскольку операции доводки достаточно продолжительны, чрезвычайно актуальны задачи снижения трудоемкости этих операций, а в лучшем случае – исключение их из технологических процессов обработки инструментов. Однако в этом слу-

чае необходимо обеспечить высокие требования по качеству обработки на операциях круглого наружного шлифования, что, к сожалению, является трудноразрешимой задачей. Учитывая важность и актуальность данной задачи, рассмотрим наиболее перспективные пути ее решения.

Традиционно операции предварительного круглого наружного шлифования твердосплавных многолезвийных инструментов выполняются с применением абразивных кругов и, как правило, с высокой производительностью обработки. Стремление форсировать режимы шлифования при съеме больших припусков приводит к снижению качества обработки – появлению на обрабатываемых поверхностях трещин, сколов и других дефектов шлифования. Удалить эти дефекты на последующих операциях чистового шлифования и доводки весьма сложно, поскольку требуется удалить относительно большие припуски, не свойственные для этих операций, что в целом снижает производительность обработки.

С целью повышения эффективности технологических операций предварительного круглого наружного шлифования на практике взамен обычных абразивных кругов используются алмазные круги. В силу высокой остроты режущих кромок алмазных зерен, эти круги позволяют уменьшить силу и температуру резания, практически исключают образование шлифовальных дефектов на обработанных поверхностях, улучшают показатели точности и шероховатости обработки. Несомненно, это повышает эффективность обработки, позволяет уменьшить припуски, оставляемые на последующие операции доводки, и снижает трудоемкость самих операций доводки.

Нами проводились предварительные экспериментальные исследования с целью обеспечения требований по шероховатости обработки при сохранении достаточно высокой производительности на операции круглого наружного шлифования специальных многолезвийных инструментов (с использованием алмазных кругов) за счет оптимизации режимов шлифования и характеристик алмазных кругов. Однако положительных результатов получить не удалось. При высокопроизводительном шлифовании алмазными кругами на металлических связках параметр шероховатости обработки  $R_a$  уменьшался лишь до уровня 0,5 мкм, чего естественно не достаточно для решения задачи. Снижение зернистости алмазного круга также не решает задачи, т.к. при этом происходит снижение производительности обработки. Следовательно, решение данной задачи требует новых подходов.

Важным резервом в этом направлении следует рассматривать управление параметрами режущего рельефа алмазного круга на металлической связке (с использованием эффективных методов его электроэрозионной и электрохимической правки), создание на рабочей поверхности алмазного круга оптимального режущего рельефа и т.д.

Следует отметить, что по производительности обработки в большинстве случаев алмазные круги уступают абразивным кругам, главным образом, в связи с высоким расходом алмаза и соответственно высокой технологической себестоимостью обработки (расходы на приобретение необходимого количества алмазных кругов для обработки партии инструментов превышают расходы на приобретение абразивных кругов). Это относится как к алмазным кругам на органических связках, так и к алмазным кругам на более прочных металлических связках. Последние характеризуются более высокой износостойкостью, однако при шлифовании быстро теряют

режущую способность по причине затупления и засаливания и требуют практически постоянной правки, в особенности при высокопроизводительном шлифовании.

Опытами установлено, что в процессе шлифования, в частности, при съеме относительно больших припусков (до 2-х мм и более) возникают значительные упругие деформации в технологической системе в связи с недостаточно жестким креплением обрабатываемых твердосплавных инструментов на станке. Это увеличивает время, затрачиваемое на выхаживание (шлифование с отключенной поперечной подачей станка), и соответственно время на выполнение операции круглого наружного шлифования. Причем, время, затрачиваемое на выхаживание, может в несколько раз превышать время шлифования. Это требует, во-первых, разработки более эффективных конструкций крепления обрабатываемых инструментов на круглошлифовальном станке, во-вторых, разработки и применения оптимальных циклов шлифования с целью снижения отрицательной роли упругих перемещений в технологической системе в формировании параметров шлифования.

На основе проведенного анализа можно заключить, что задачи повышения эффективности технологических операций круглого наружного алмазного шлифования специальных твердосплавных инструментов весьма актуальны в связи с высокой трудоемкостью обеспечения требований по точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей в условиях съема больших припусков и низкой жесткости крепления обрабатываемых инструментов на станке. Как отмечалось выше, эффективным решением может быть обеспечение требований по точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей (заданных чертежом) уже на операции круглого наружного алмазного шлифования. Тогда отпадет необходимость применения трудоемких операций доводки или в худшем случае – снизится их трудоемкость, что позволит в целом повысить эффективность технологического процесса обработки инструмента.

Исходя из этого, нами создан эффективный технологический процесс финишной обработки цилиндрических поверхностей твердосплавных изделий, базирующийся на следующих новых научных результатах [1–4]:

1. Разработаны аналитические модели производительности и основного времени переходов операции круглого наружного продольного алмазного шлифования, включающей черновое шлифование и выхаживание, и аналитическая модель величины упругого перемещения в технологической системе, возникающего на каждом переходе операции шлифования. На их основе проведена оптимизация структуры и параметров рассматриваемой операции шлифования по критерию наибольшей производительности обработки с учетом ограничения по точности обработки, позволившая установить оптимальное соотношение припусков, удаляемых на каждом переходе операции шлифования. Теоретически доказано, что оптимальной по структуре является операция шлифования, включающая лишь переход выхаживания. Для ее реализации необходимо в начале обработки создать натяг в технологической системе, равный величине снимаемого припуска. Наиболее эффективной областью применения данного технического решения являются технологические операции круглого наружного продольного шлифования с недостаточно жестким креплением обрабатываемого изделия на станке.

2. Теоретически установлено, что для осуществления оптимальной по структуре операции шлифования требуется обеспечить высокую режущую способность

круга. Это достигается применением алмазных кругов на металлических связках с их электроэрозионной правкой. В процессе электроэрозионной правки необходимо обеспечить высокую остроту режущих зерен и их увеличенное выступание над уровнем связки алмазного круга, что позволит увеличить толщины срезов отдельными зернами и соответственно производительность обработки. Теоретически и экспериментально установлено, что при невыполнении данных условий производительность обработки уменьшается, и операция шлифования должна включать как переход выхаживания, так и переход черного шлифования. Чем ниже режущая способность алмазного круга, тем больше длительность черного шлифования и больше удаляемый при этом припуск.

3. Разработаны новые инженерные методики расчета оптимальных параметров операций круглого наружного продольного алмазного многопроходного и глубинного шлифования: длительности операций и их переходов; величин припусков, снимаемых на каждом переходе в зависимости от требований по точности обработки (определяемой величиной упругого перемещения в технологической системе) и параметров, определяющих режущую способность алмазного круга.

4. Разработана аналитическая модель силы резания при круглом наружном продольном алмазном шлифовании по жесткой и упругой схемам с фиксированным радиальным и тангенциальным усилием. Теоретически обоснованы условия, при которых затупление режущих зерен в меньшей мере влияет на увеличение силы резания при заданной производительности обработки. Показана эффективность применения в этом направлении упругой схемы круглого наружного шлифования с фиксированным тангенциальным усилием.

5. Теоретически показано существование трех принципиальных схем формирования шероховатости поверхности при шлифовании, обусловленных кинематикой движения обрабатываемой поверхности по отношению к рабочей поверхности шлифовального круга: в радиальном, тангенциальном и продольном (со стороны торцовой поверхности круга) направлениях. Теоретически установлено, что наибольшее число зерен участвует в формировании шероховатости обрабатываемой поверхности при шлифовании по третьей схеме, а наименьшее – при шлифовании по первой схеме. В результате наименьшая шероховатость поверхности достигается при шлифовании по третьей схеме, а наибольшее – при шлифовании по первой схеме. Вторая схема (включающая плоское, круглое наружное и внутреннее шлифование) занимает промежуточное положение.

6. Разработана новая аналитическая модель формирования шероховатости цилиндрических поверхностей при круглом наружном алмазном шлифовании с учетом разновысотного выступания режущих зерен над уровнем связки круга и вероятностного характера участия зерен в резании. Установлено, что учет разновысотного выступания режущих зерен над уровнем связки круга приводит к заниженным (в пределах 20%), а учет вероятностного характера участия зерен в резании – к завышенным (в пределах 27%) значениям шероховатости (по отношению к экспериментальным данным).

7. Теоретически и экспериментально обосновано основное направление уменьшения шероховатости цилиндрических поверхностей твердосплавных изделий при круглом наружном алмазном шлифовании, состоящее в обеспечении примерно одновысотного выступания режущих зерен над уровнем связки круга и образовании

на них значительных площадок износа путем выполнения технологических операций электроэрозионной правки алмазного круга на металлической связке и его обтачивания алмазным правящим карандашом. Экспериментально установлено, что при этом параметр шероховатости  $R_a$  уменьшается с 2,0 до 0,1-0,2 мкм, т.е. в 10-20 раз. Это открывает новые технологические возможности прецизионной алмазной обработки цилиндрических поверхностей твердосплавных изделий.

8. Экспериментально установлено, что алмазные круги на металлических связках М1-01 и М1-10 после их электроэрозионной правки и обтачивания алмазным правящим карандашом обладают достаточно высокой режущей способностью и могут длительное время работать в режиме самозатачивания. При этом, с течением времени шлифования шероховатость обработанной поверхности несколько увеличивается – в большей степени при шлифовании алмазным кругом на металлической связке М1-01 и в меньшей степени при шлифовании алмазным кругом на более прочной металлической связке М1-10.

9. Проведено сравнение технологических параметров операций круглого наружного алмазного шлифования алмазным кругом на металлической связке после его электроэрозионной правки и после его обтачивания алмазным правящим карандашом. Установлено, что во втором случае производительность обработки в 2 раза, а шероховатость обработки в 10-20 раз меньше, чем в первом случае при заданной точности обработки. Мощность шлифования при этом увеличилась всего в 2 раза. Это позволяет эффективно совместить предварительное и окончательное шлифование в одну операцию с обеспечением высоких показателей шероховатости, точности и производительности обработки, не требующим применения последующей трудоемкой операции доводки.

10. Показано, что по критериям наибольшей производительности и наименьшей технологической себестоимости обработки более эффективным является вариант технологического процесса, включающий лишь операцию круглого наружного шлифования алмазным кругом на металлической связке после его электроэрозионной правки и обтачивания алмазным правящим карандашом, обеспечивающий выполнение высоких требований по шероховатости и точности обработки.

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработан эффективный технологический процесс финишной обработки цилиндрических поверхностей твердосплавных изделий, который обеспечивает повышение производительности и снижение технологической себестоимости при выполнении высоких требований по качеству обработки (параметр шероховатости  $R_a = 0,1$  мкм) на операции круглого наружного продольного шлифования алмазным кругом на металлической связке. Это позволяет в ряде случаев исключить последующую трудоемкую операцию доводки свободным абразивом (алмазной пастой) из технологического процесса, а в ряде случаев снизить ее трудоемкость, что в целом в несколько раз повышает производительность технологического процесса обработки. Разработанный эффективный технологический процесс финишной обработки цилиндрических поверхностей твердосплавных изделий алмазными кругами на металлических связках внедрен на Харьковском машиностроительном заводе “ФЭД” с экономическим эффектом 87,0 тыс. гривен в год.

**Литература:** 1. Новиков Ф.В., Дитиненко С.А. Оптимизация структуры и параметров операции круглого наружного алмазного шлифования твердосплавных поверхностей // Високі техно-

логії в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2004. – Вип. 2(9). С. 155-160. 2. Новиков Ф.В., Дитиненко С.А. Повышение качества обработки при круглом наружном алмазном шлифовании специальных твердосплавных инструментов // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2004. – Вып. 67. С. 74-85. 3. Новиков Ф.В., Дитиненко С.А. Технология и теория прецизионной обработки твердосплавных инструментов алмазными кругами на металлических связках // Труды 8-й Международной научно-технической конференции. Физические и компьютерные технологии. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2003. – С. 34-39. 4. Дитиненко С.А., Новиков Ф.В. Повышение эффективности технологии прецизионной обработки твердосплавных цилиндрических поверхностей // Труды 9-й Международной научно-технической конференции. Физические и компьютерные технологии. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2004. – С. 7-11.

**УДК 621.923**

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОБРАБАТЫВАЕМОМ МАТЕРИАЛЕ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ТОРЦЕВЫМ ПРЕРЫВИСТЫМ КРУГОМ**

**Якимов А.А.**, канд. техн. наук (г. Одесса, Украина)

*Mathematical modelling of thermomechanical processes in a superficial layer of processable details at face faltering grinding.*

При прерывистом шлифовании каждый отдельный участок обрабатываемой поверхности контактирует со шлифовальным кругом неоднократно. В результате того, что скорость, с которой движутся режущие выступы, значительно выше скорости подачи детали, режущие выступы круга с прерывистой рабочей поверхностью успевают несколько раз воздействовать на один и тот же участок обрабатываемой поверхности. Поскольку процесс шлифования сопровождается значительным выделением тепла, то при каждом воздействии режущего выступа на поверхность в зоне контакта круга и поверхности имеет место быстрый рост температуры, который прекращается при завершении воздействия. В промежутках между контактами режущих выступов с поверхностью температура естественно снижается.

Таким образом, схематический график изменения температуры при прерывистом шлифовании будет представлять собой последовательность пиков и спадов подобно схеме изменения температуры при термоциклической обработке.

Если рассмотреть процесс торцевого прерывистого шлифования кругом с шириной рабочей поверхности  $h_p$  (рис. 1), количеством режущих выступов  $m$  при частоте вращения круга  $n$  и скорости подачи детали  $V_\Delta$ , то за время прохождения рабочей поверхности круга над некоторой фиксированной точкой  $M$  обрабатываемой поверхности, в точке  $M$  будут иметь место  $k$  термоциклов, количество которых  $k$  может быть определено по формуле

$$k = \frac{l}{V_\Delta} nm,$$

где  $l$  – выражается формулой  $l = \sqrt{r_1^2 - h^2} - \sqrt{r_2^2 - h^2}$ ;  $r_1$  – радиус внешней кромки круга;  $r_2$  – радиус внутренней кромки круга;  $h$  – расстояние от рассматриваемой точки поверхности  $M$  до линии движения оси круга.

Таким образом, окончательное выражение примет вид:

$$k = \frac{\sqrt{r_1^2 - h^2} - \sqrt{r_2^2 - h^2}}{V_\Delta} \cdot n \cdot m. \quad (1)$$

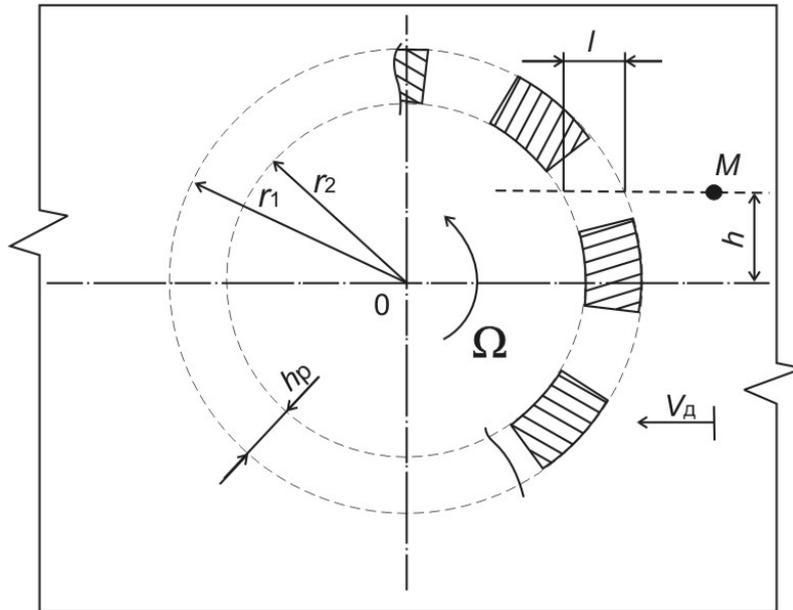


Рис. 1. Схема расположения и движения пятен контакта по поверхности при торцевом прерывистом шлифовании.

В качестве примера рассмотрим следующие режимы обработки. При частоте вращения  $n = 3000 \text{ 1/мин} = 50 \text{ 1/с}$ , скорости подачи детали  $V_d = 15 \text{ м/мин} = 0,25 \text{ м/с}$ , количестве режущих выступов на рабочей поверхности круга  $m = 10$ , радиусе внешней и внутренней кромки круга соответственно  $r_1 = 15 \text{ см} = 0,15 \text{ м}$  и  $r_2 = 14 \text{ см} = 0,14 \text{ м}$ , расстоянии до линии движения оси круга  $h = 0$ , т.е. точка находится на линии движения оси и  $l = r_1 - r_2 = h_p$ , количество термоциклов будет равно

$$k = \frac{0,15 - 0,14}{0,25} \cdot 50 \cdot 10 = 20.$$

Если же точка  $M$  будет находиться на некотором расстоянии  $h$  от линии движения оси круга, например,  $h = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$ , то

$$k = \frac{\sqrt{0,15^2 - 0,1^2} - \sqrt{0,14^2 - 0,1^2}}{0,25} \cdot 50 \cdot 10 = 27,7 \approx 28.$$

Таким образом, из формулы и приведенных примеров, очевидно, что в точке, удаленной от линии движения оси круга, количество термоциклов будет больше, чем в точке, находящейся непосредственно на линии движения оси.

Анализ формулы (1) позволяет сделать вывод: при уменьшении скорости подачи обрабатываемой детали  $V_d$ , при увеличении частоты вращения круга  $n$ , увеличении количества  $m = 10$  режущих выступов на круге или ширины рабочей поверхности круга  $h_p$  количество термоциклов возрастает.

При торцевом шлифовании сплошным кругом зона контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью представляет собой кольцо, движущееся по шлифуемой поверхности со скоростью равной скорости подачи детали. Внутри этого кольца происходит интенсивное тепловыделение. Таким образом зону контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью можно рассматривать как движущейся кольцевой тепловой источник. При этом шлифуемое тело представляется полубесконечным пространственным телом, ограниченным плоскостью, по которой движется кольцевой тепловой источник со скоростью  $V_d$ , то есть со скоростью подачи обрабатываемой детали.

При отсутствии зависимости теплофизических характеристик от температуры, процесс тепловыделения описывается уравнением

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \omega \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + V_x \frac{\partial \theta}{\partial x} + V_y \frac{\partial \theta}{\partial y} + V_z \frac{\partial \theta}{\partial z}. \quad (2)$$

Построение решения основано на известном решении уравнения (2) для мгновенного точечного теплового источника

$$\theta(x, y, z, t) = \frac{Q}{\lambda \sqrt{\omega} (4\pi t)^{3/2}} \exp \left( - \frac{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}{4\omega t} \right), \quad (3)$$

где  $Q$  – мощность теплового источника;  $\lambda$ ,  $\omega$  – теплофизические постоянные;  $x, y, z$  – текущие координаты;  $x', y', z'$  – координаты теплового источника.

Это решение соответствует следующим граничным и начальным условиям:  $q(\infty, t) = 0$ ;  $q(0, t) = q$ ;  $\theta(x, y, z, 0) = 0$ .

Традиционно на основе этого решения при помощи метода тепловых источников строятся решения для линейных и плоских тепловых источников, границы которых представляют собой отрезки или прямые, расположенные параллельно осям декартовых координат  $0x, 0y, 0z$ .

В рассматриваемом случае применение этого метода вызывает трудности, связанные с описанием в декартовых координатах криволинейных границ источника. Сущность метода тепловых источников состоит в том, что тепловой источник произвольной формы, плоский или объемный, полагается как бы непрерывно заполненным по всему своему объему точечными тепловыми источниками. Таким образом, в рассматриваемом случае точечные тепловые источники непрерывно заполняют плоскую поверхность внутри кольца и, следовательно, границами такого теплового источника будут окружности.

В решении (3)  $x, y, z$  – координаты точки, температура которой определяется;  $x', y', z'$  – координаты точки, в которой находится тепловой источник.

Таким образом, имеет место две системы координат, совмещенные в пространстве. Одна из них определяет положение теплового источника, другая – положение наблюдаемой точки поверхности. Обе системы координат имеют общую начальную точку и одинаковое направление осей. Но тогда не обязательно обе системы координат должны иметь одинаковую форму записи.

Представив в решении (3) координаты точечного теплового источника  $x', y', z'$  в виде

$$\begin{cases} x' = r \cos \varphi \\ y' = r \sin \varphi \\ z' = z' \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} x' = r \cos \varphi \\ y' = r \sin \varphi \\ z' = 0 \end{cases}$$

$z' = 0$ , так как в рассматриваемом случае источник находится на шлифуемой поверхности, т.е. на плоскости  $0XY$ , т.е. осуществив переход к полярным координатам, можно решение (3) записать в виде

$$\theta(x, y, z, t) = \frac{Q}{\lambda \sqrt{\omega} (4\pi t)^{3/2}} \exp \left[ - \frac{(x - r \cos \varphi)^2 + (y - r \sin \varphi)^2 + z^2}{4\omega t} \right].$$

Рассматриваемый кольцевой источник, как уже говорилось, движется по поверхности, тогда точечные источники, заполняющие площадь кольцевого источника, каждый в отдельности, также движутся по плоскости. Пусть источник движется вдоль оси  $Oy$ , тогда для каждого отдельного точечного теплового источника  $y' = r \sin \varphi + V_{\partial} t$ .

Полагая  $Q = qdt$ ,  $q = const$ , можно записать выражение, описывающее процесс тепловыделения от элементарного источника тепла на бесконечно малой площадке в бесконечно малый промежуток времени [1]:

$$d\theta = \frac{qdrd\varphi dt}{\lambda\sqrt{\omega}(4\pi(t-t'))^{3/2}} \exp\left[-\frac{(x-r\cos\varphi)^2 + (y-r\sin\varphi + V_{\partial}(t-t'))^2 + z^2}{4\omega t}\right], \quad (4)$$

где  $t'$  – момент воздействия теплового источника.

Интегрируя выражение (4) по  $r$  в пределах  $r_1$  до  $r_2$  ( $r_1$  – радиус внешней кромки рабочей поверхности круга;  $r_2$  – радиус внутренней кромки рабочей поверхности круга) по  $\varphi$  в пределах от 0 до  $2\pi$  и по  $t$  в пределах от 0 до  $t$ , получим решение, описывающее процесс тепловыделения, происходящего при действии кольцевого теплового источника, движущегося по плоскости, ограничивающей рассматриваемое полубесконечное тело, в момент времени  $t'$ :

$$\theta(x, y, z, t) = \int_0^t \frac{q}{\lambda\sqrt{\omega}(4\pi(t-t'))^{3/2}} \times \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{2\pi} \exp\left[-\frac{(x-r\cos\varphi)^2 + (y-r\sin\varphi + V_{\partial}(t-t'))^2 + z^2}{4\omega(t-t')}\right] d\varphi dr dt'. \quad (5)$$

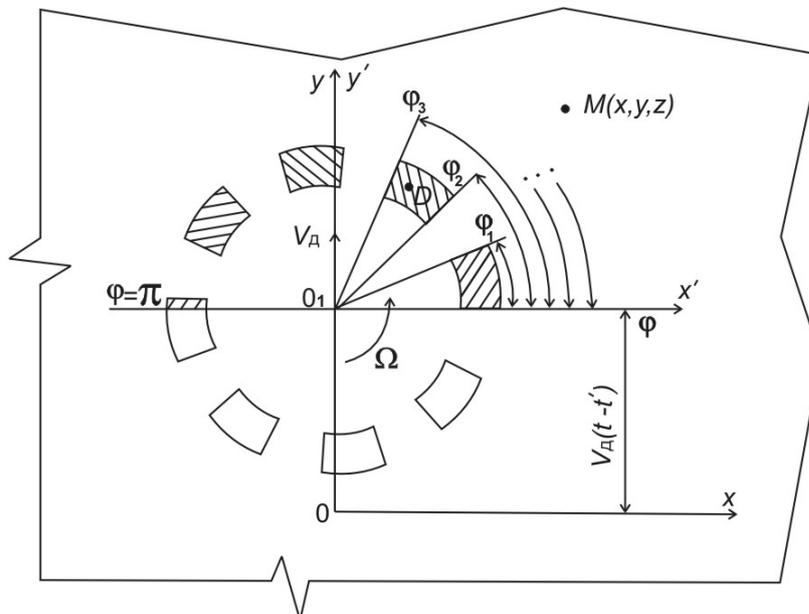


Рис. 2. Расчетная схема математической модели торцевого прерывистого шлифования.

Как уже было сказано, при рассмотрении сплошного торцевого шлифования, то, что круг вращается, не играет существенной роли, так как зона контакта имеет постоянную форму и тепловой источник может полагать кольцом или точнее полукольцом. При рассмотрении же прерывистого торцевого шлифования, зона контакта

круга с шлифуемой поверхностью представляет собой последовательность радиально расположенных пятен контакта (рис. 2), совершающих плоскопараллельное движение, а именно: одновременно с движением вдоль оси  $Oy$  совершает вращение зон контакта вокруг оси вращения шлифовального круга.

Таким образом, требуется рассмотреть последовательность тепловых источников, определяемых границами:  $r_1 \leq r \leq r_2$ ;  $\varphi_{2k} \leq \varphi \leq \varphi_{2k+1}$ ;  $k = \overline{0, n-1}$ .

Причем углы  $\varphi_i$ , определяющие граничные прямые, будут непрерывно меняться с течением времени в результате вращения круга с угловой скоростью  $\Omega$ . Так как угловую скорость вращения круга в установившемся режиме шлифования можно считать величиной постоянной, а для  $\Omega = const$ ,  $\varphi_i = \Omega t + \varphi_0$ , то углы  $\varphi_i$  будут изменяться по закону  $\varphi_i = \varphi_{i0} + \Omega t$ .

Таким образом, решение для отдельного теплового источника из рассматриваемой последовательности тепловых источников, движущегося в положительном направлении координатной оси  $Oy$  и заключенного в границах  $r_2 \leq r \leq r_1$ ;  $\varphi_i \leq \varphi \leq \varphi_{i+1}$  примет вид

$$\theta(x, y, z, t) = \int_0^t \frac{q}{\lambda \sqrt{\omega} (4\pi(t-t'))^{3/2}} \times \times \int_{r_1}^{r_2} \int_{\varphi_i}^{\varphi_{i+1}} \exp \left[ -\frac{(x - r \cos \varphi)^2 + (y - r \sin \varphi + V_\partial(t-t'))^2 + z^2}{4\omega(t-t')} \right] d\varphi dr dt'. \quad (6)$$

Решение же для всей совокупности тепловых источников будет представлять собой сумму решений для отдельных источников, так как одновременное нахождение этих источников на плоскости обуславливает их совместное одновременное воздействие на некоторую точку, имеющую координаты  $x, y, z$ :

$$\theta(x, y, z, t) = \int_0^t \frac{q}{\lambda \sqrt{\omega} (4\pi(t-t'))^{3/2}} \times \times \int_{r_1}^{r_2} \sum_{i=0}^n \int_{\varphi_{2k} + \Omega t}^{\varphi_{2k+1} + \Omega t} \exp \left[ -\frac{(x - r \cos \varphi)^2 + (y - r \sin \varphi + V_\partial(t-t'))^2 + z^2}{4\omega(t-t')} \right] d\varphi dr dt'. \quad (7)$$

Аналогично ранее рассмотренному случаю сплошного шлифования есть все основания наложить дополнительное ограничение на углы  $\varphi_i$ , определяющие границы источников, так как режущие выступы, находящиеся с тыльной части круга, проходят под той частью поверхности, с которой основная часть материала удалена прошедшими здесь режущими выступами фронтальной части круга, следовательно тепловые процессы, происходящие в этой зоне, не имеют определяющего значения для температуры шлифуемой поверхности. Таким образом, для решения имеют значения те выступы, границы которых находятся в пределах  $0 \leq \varphi_i \leq \pi$ .

Включить ограничение  $0 \leq \varphi_i \leq \pi$  в решение (7) не представляется возможным, т.к. как уже указывалось, что углы  $\varphi_i$  являются функциями от времени и постоянно изменяются.

Однако, если учесть, что точное интегрирование даже более простого выражения (6) приводит к достаточно трудоемким выкладкам, причем окончательное вы-

ражение будет выражено через специальные функции, то интегрирование выражений (5) и (7) целесообразно сразу проводить при помощи численных методов интегрирования [2].

В этом случае ограничение (7) может быть учтено при составлении алгоритма и программы расчета, т.е. численное интегрирование будет осуществляться только в пределах, удовлетворяющих ограничению  $0 \leq \varphi_i \leq \pi$ .

Таким образом, исключаются из расчета те режущие выступы, для которых условия ограничения не выполняются, т.е. находящиеся на тыльной стороне круга.

**Литература:** 1. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с. 2. Тепловые процессы при обычном и прерывистом шлифовании /А.В. Якимов, Б.О. Ткаченко, С.Г. Зимин, А.А. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков. – Одесса: ОГПУ, 1998. – 273 с.

**УДК 621.512**

### **РОЛЬ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ В РАЗВИТИИ УКРАИНЫ**

**Крюк А.Г.**, канд. техн. наук, **Браташевский А.Ю.**, канд. техн. наук,

**Дудко П.Д.**, кандт. техн. наук (г. Харьков, Украина)

*Factors of development Ukrain in conditions of market economy are submitted.*

Ученые мира вначале XX столетия уверенно прогнозировали, что стремительное развитие науки и индустриального производства обеспечат в ближайшее время человечеству товарное изобилие, всеобщее благоденствие и процветание. Однако вера в науку как могучую силу радикального и быстрого улучшения жизни оказалась иллюзией. Более того, многие научные и технические достижения XX столетия были использованы с разрушительной целью или же привели к непредсказуемым экологически вредным последствиям. Сегодня человечество стоит перед безвозвратным загрязнением окружающего пространства и космоса, катастрофическим истощением природных ресурсов, перед медикаментозной деформацией биологического состояния человеческого организма и многими другими отрицательными явлениями.

Окончание столетия ознаменовалось разочарованием в научно-техническом прогрессе, что породило мощный всплеск антинаучных настроений в различных странах и слоях общества. Гуманизацию начали рассматривать в противовес научности.

Вместе с тем, переступивши порог XXI века и всесторонне оценивая влияния науки на различные стороны общественного и товарного развития, человечество подошло к четкому осознанию трех наиболее важных положений.

Во-первых, обычный отказ от научно-технического прогресса – шаг более разрушительный, чем предшествующее стихийное развитие. Негативные явления, связанные с предыдущим развитием науки и техники, могут быть частично уменьшены, а во многих случаях полностью подавлены только лишь с помощью рационального социально- и экологически ориентированного применения новых результатов науки, к товарному производству в условиях рынка.

Во-вторых, в науке начали происходить глубокие фундаментальные изменения, которые касаются соотношения и доминирования теоретических и прикладных знаний. Значительность приобретает наука о человеке, обществе и вопросах их гу-

манного существования и развития. Доброе становится основной товарной ценностью.

И, в-третьих, стало очевидным, что освоение окружающего космического пространства, создание информационного сообщества и глобальных информационных сетей требует совершенно иного уровня интеллектуальной подготовки всего человечества к «новому способу жизни». Эта подготовка должна полностью базироваться не только на естествознании, но прежде всего на социально-антропологических и гуманитарных фундаментах как основе для принятия решений, которые обеспечили бы выживания человечества.

С этих позиций можно оценить как полностью положительные последствия научного и технического прогресса, которые дают возможность продлить жизнь людей, сделать рациональным природопользование, улучшить качество жизни, поднять выше уровень культуры, а проще говоря – сберечь и обеспечить развитие цивилизации. На смену коленоприклоненному увлечению наукой и техникой первой четверти XX столетия и противонаучному настроению конца столетия приходит трезвое понимание значения науки и техники как способа организации жизни и управления будущим – способу синхронно безопасного и могущественного и одновременно более эффективного, чем разгул капитала и бряцание ракетами и водородной бомбой.

Сегодня все больше в основе оценки и характеристики стран становится не могущество вооруженных сил и не экономические показатели – деление стран на бедных и богатых, индустриальных и сельскохозяйственных, а способность генерировать и выходить на рынок знаний (через систему образования). Наличие наукоемких и высоких технологий, которые эти знания реализуют.

Страны, генерирующие научные знания, наукоемкие и высокие технологии, относятся к экономическим, технологическим, научным и военным лидерам.

Поэтому вопросы о перспективе науки и технологий, которые основываются на их достижениях, сегодня представляют интерес не только для научного сообщества, это вопрос высшей государственной политики. Потому что только государства с мощной научной базой могут обеспечить себе устойчивое развитие и могут быть гарантом разумного баланса сил в мире.

При этом следует иметь в виду, что установка на то, что наша наука (то есть наука Украины) должна решать абсолютно все проблемы, какие стоят перед научным миром сегодня, задача неосуществимая.

Нам необходимо на уровне государственной политики определить оптимальное количество национальных приоритетов, исходя из перспективных заданий, которые стоят перед обществом, а не групповых или ведомственных интересов.

Образовательным технологиям выделяется приоритетное значение, ибо без подготовки надлежащего количества высококвалифицированных специалистов, способных освоить все эти достижения науки и технологии, воплотить их в жизнь, изменить социальную среду и культуру, наука и технология существовать не могут, они будут предметом ненужных колоссальных материальных и духовных сил общества.

Те, кто занимается прогнозированием развития науки в начале XXI века, должны четко усвоить положение, что это не стихийный рыночный процесс и что он зависит, прежде всего, от политики государства. Пока что коммерческие структуры,

располагающие денежными средствами, еще не скоро станут главными потребителями и покупателями научной продукции. Поддерживая их заинтересованность в отечественной науке и передовых технологиях, стимулируя трансфер всего лучшего из-за границы, государственные деятели должны учитывать, что мировое сотрудничество и, в первую очередь, высокоразвитые страны в ближайшие годы должны стать на путь устойчивого развития. Это означает, что механизм рыночной экономики надо будет существенно ограничить, поскольку потребности на товары и услуги постоянно растут, требуют их дорогостоящего производства с огромными затратами, не восстанавливаемыми природными ресурсами. Этот механизм несовместим с экологическим социально-безопасным самообеспечивающим развитием.

Для общества, которое живет в режиме устойчивого развития, будут необходимы иные технологии, критерии обеспеченности, товарного производства и экономики в целом. Поэтому, прогнозируя состояние науки и технологии в XXI столетии, необходимо уяснить, что они зависят не только от законов рынка, но прежде всего от нашей воли, от стремления к настоящему благосостоянию, в котором главной ценностью будет не прибыль, не капитал, а гармоничное развитие личности, прав человека, социальная устойчивость, высокая культура и образованность.

Необходимо помнить еще о том обстоятельстве, что все процессы в современном обществе функционируют и развиваются в условиях глобализации.

Глобализация – продукт постмодерна, перехода от индустриальной к постиндустриальной стадии развития общества, формирования основ ноосферно-космической цивилизации. Отсюда вытекают количественные и качественные характеристики этого процесса. К важнейшим характеристикам относятся – рост взаимозависимости экономики различных стран, целостность и единство мирового хозяйства.

В результате применения новых, то есть высоких технологий и систем электронных связей развиваются глобальные коммуникационные сети (такие, как Интернет, всемирная финансовая система СВИФТ и др.), что приводит к сокращению сферы государственного контроля. Научно-технические достижения дают возможность сократить затраты на осуществление межгосударственных и межфирменных контактов.

Формирование глобальной системы товарного производства и соответствующей инфраструктуры, динамическое перемещение ресурсов по всему пространству мирового хозяйства, функционирование всемирных информационных и транспортных коммуникаций свидетельствует о наступлении новой эры экономического и общественного развития. Его сущность состоит в возрастающем значении всемирных факторов и источников хозяйственной динамики. Это обстоятельство в свою очередь создает условия для формирования универсального экономического знания, которое адекватно отражало бы общий процесс хозяйственной эволюции без привязывания к конкретной стране или территории. Такое знание становится основой для правильной постановки и решения ряда наиболее острых глобальных проблем (товарных, экологических, правовых, демографических и др.).

Трансформация экономической системы Украины, переход ее в новое качество – процесс который определяется социально-экономическими и научно-техническими параметрами XXI столетия. Этот процесс должен базироваться на:

- 1) общецивилизованных условиях и данных, которые формируют систему коор-

динат современного всемирного рыночного хозяйства;

2) национальных приоритетах и особенностях, которые имеют глубокие историко-генетические и ментально-этнические источники;

3) реальном состоянии экономики и общества Украины.

Последнее положение есть главным исходным материалом, первоосновой, фундаментом, на котором базируется новая политико-экономическая система. Именно взаимодействие этих трех составляющих даст возможность Украине избежать резких отклонений, смягчить удары переходного периода, ускорить гармонизацию и присоединение Украины к общецивилизованным процессам и структурам.

В связи с трансформацией индустриальной цивилизации в ноосферно-космическую (постиндустриальную) возникают определенные промежуточные формы. Такой становится информационная модель развития, которая является продуктом индустриальной эпохи и одновременно важнейшим условием формирования цивилизации третьего тысячелетия.

Ноосферно-космическая цивилизация должна не только решить наиболее острые проблемы и устранить противоречия предшествующей эпохи, а и определить пути дальнейшего развития человечества.

Естественно, что в ходе развития будут происходить постоянные корректировки намеченных положений, а сейчас мы находимся на пороге революционных подвижек в экономической теории, увязанной с формированием интеллектуально-информационной парадигмы, без чего невозможно управление развитием, отвечающим жизненным потребностям общества XXI века.

**Литература:** Товароведение / Под ред. П.Д. Дудко и А.Г. Крюка – Харьков: Издательский Дом "ИНЖЕК", 2005. – 456 с.

**УДК 621.771.63**

**ПРИНЦИПИАЛЬНО НОВЫЙ СОРТАМЕНТ СПЕЦИАЛЬНЫХ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРОТИВОСКОЛЬЖЕНИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА ПОСТАВКУ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ**

**Плеснецов Ю.А., канд. техн. наук, Крюк А.Г., канд. техн. наук**  
(г. Харьков, Украина)

*The new nomenclature of the special bent structures with a surface of ant sliding for steps of ladder marches of industrial buildings is submitted. The properties of ant sliding on new structures carry out periodic elements triangular in cross section of the forms located on a surface in the chess order.*

Для ступеней лестничных маршей в строительстве промышленных зданий массовое применение находит рифленая горячекатаная сталь толщиной 4 мм. Высота рифтов на горячекатаном металле не превышает 1 мм из-за трудностей технологических и последующей термообработки. Вместе с тем, сравнительно быстрый износ рифтов, невозможность замены рифленой стали толщиной 4 мм листами толщиной 2,5...3 мм без дополнительного усиления этих листов, делают очевидной необходимость разработки специальных профилей с элементами противоскольжения высотой до 5 мм и способов их получения.

Цель работы – новый сортамент специальных гнутых профилей с элементами противоскольжения высотой до 5 мм и определение технических требований к ним.

1. Разработка специальных гнутых профилей 200x50x20x2,5мм и 170x50x20x2,5мм с поверхностью противоскольжения и технических условий на поставку продукции.

Специальные гнутые профили 200x50x20x2,5 мм и 170x50x20x2,5 мм [1] разработаны взамен несимметричных уголков 200x50x4 мм, 170x50x4 мм, изготавливавшихся ранее из рифленой горячекатаной стали Магнитогорским заводом металлоконструкций (МЗМК) в соответствии с требованиями к типовым конструкциям ступеней лестничных промышленных зданий серии 1.450.3-3 (выпуск 0.1 серии 1 и 2). При разработке профилей габариты опорных площадок были оставлены без изменений (200 мм и 170 мм), передняя подогнутая полка также – 50 мм. Из-за уменьшения толщины металла (с 4 мм до 2,5 мм) на опорной площадке новых профилей были предусмотрены 2 продольных ребра жесткости и дополнительная полка шириной 20 мм, подогнутая под углом 75°. Обеспечение эффекта противоскольжения достигается рифтами треугольной в поперечном сечении формы и смещением их в продольных рядах друг относительно друга до расположения в шахматном порядке. Результаты расчетов геометрических характеристик сечений разработанных профилей приведены в табл. 1. При расчетах учтены следующие отклонения: по толщине ( $S$ ) заготовки (сталь марки Ст. 3) в диапазоне 2,29...2,7 мм (2,5 мм - номинальное значение); по высоте ( $H$ ) гофра 7,5<sup>+1,5</sup> мм.

Таблица 1

Геометрические характеристики сечений профилей 200x50x20x2,5 мм и 170x50x20x2,5 мм

$S$ , мм	$H$ , мм	$F$ , см <sup>2</sup>	Координаты центра тяжести		$I_x$ , см <sup>4</sup>	$I_y$ , см <sup>4</sup>	$I_{xy}$ , см <sup>4</sup>	$W_{x_3}$ , см <sup>3</sup>	$W_{y_3}$ , см <sup>3</sup>
			$x_0$ , см	$y_0$ , см					
Профиль 200x50x20x2,5 мм									
2,5	7,5	6,28	8,88	- 0,17	7,11	312,05	19,30	1,74	26,82
2,5	9,0	6,21	8,86	- 0,10	6,77	313,23	18,72	1,69	26,87
2,5	6,0	6,36	8,90	- 0,24	7,36	310,82	19,91	1,77	26,76
2,7	7,5	6,86	8,89	- 0,17	7,64	336,18	20,93	1,87	28,90
2,7	9,0	6,73	8,86	- 0,10	7,11	337,61	20,30	1,78	28,97
2,7	6,0	6,88	8,90	- 0,24	7,85	334,68	21,57	1,89	28,82
2,29	7,5	5,75	8,88	- 0,17	6,32	287,49	17,68	1,55	24,70
2,29	9,0	5,68	8,86	- 0,10	6,01	288,42	17,14	1,50	24,73
2,29	6,0	5,83	8,90	- 0,24	6,74	286,52	18,22	1,62	24,66
Профиль 170x50x20x2,5 мм									
2,5	7,5	5,66	7,52	- 0,22	6,82	211,08	15,91	1,69	21,12
2,5	9,0	5,64	7,54	- 0,14	6,50	213,59	15,42	1,64	21,40
2,5	6,0	5,69	7,51	- 0,29	7,15	208,58	16,40	1,74	20,83
2,7	7,5	5,13	7,52	- 0,22	7,39	226,99	17,25	1,83	22,70
2,7	9,0	6,10	7,53	- 0,14	7,11	229,75	16,73	1,79	23,01
2,7	6,0	6,15	7,50	- 0,29	7,81	224,24	17,71	1,90	22,39
2,29	7,5	5,19	7,53	- 0,22	6,23	194,85	14,58	1,55	19,50
2,29	9,0	5,17	7,54	- 0,14	6,01	197,11	14,15	1,52	19,76
2,29	6,0	5,22	7,51	- 0,29	6,56	192,61	15,02	1,60	19,24

Результаты испытаний ступеней лестничных на МЗМК показали, что они отвечают современным требованиям промышленности строительных конструкций. По результатам испытаний разработаны технические условия ТУ 14-2-815. Освоение технологии производства специальных гнутых профилей с поверхностью противоскольжения производилось на профилегибочном агрегате (ПГА) с непрерывным процессом профилирования 1...4x50...300 Магнитогорского металлургического комбината (ММК). Расчет ширины заготовки и калибровок валков производился по известной [2] методике. Ширина заготовки для профиля размерами 200x50x20x2,5 мм составляет 257,5<sub>-1</sub> мм, для профиля 170x50x20x2,5 мм – 227,5<sub>-1</sub> мм.

2. Анализ качества профилей 200x50x20x2,5 мм и 170x50x20x2,5 мм.

Результаты промышленного освоения подтвердили правильность разработанной технологии. Профили получены в соответствии с техническими требованиями ТУ 14-2-815. Анализ качества профилей выполнен в соответствии с требованиями работ [3-5].

### **Выводы**

1. Разработан принципиально новый сортament специальных гнутых профилей с поверхностью противоскольжения для ступеней лестничных маршей промышленных зданий. Свойства противоскольжения на новых профилях выполняют периодические гофры треугольной в поперечном сечении формы, расположенные на поверхности в шахматном порядке.

2. В результате освоения технологических процессов производства специальных гнутых профилей с поверхностью противоскольжения на стане 1...4x50...300 ММК получены промышленные партии новых профилей, соответствующие требованиям технических условий ТУ 14-2-815. Выполненный анализ качества профилей подтвердил стабильность технологических параметров и геометрических размеров профилей. Металлопродукция прошла необходимые испытания.

**Литература:** 1. Плеснецов Ю.А. Новая технология валковой формовки специальных деформационно упрочненных гнутых профилей с поверхностью противоскольжения. - Восточно-европейский журнал передовых технологий, № 6 (12), 2004. – С. 24-25. 2. Производство гнутых профилей (Оборудование и технология) / И.С. Тришевский, А.Б. Юрченко, В.С. Марьин и др./ Под ред. И.С. Тришевского. - М.: Металлургия, 1982. - 384 с. 3. ГОСТ 8.207. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения. - М.: Издательство стандартов, 1981. – 10 с. 4. Гутер Р.С., Овчинский Б.В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта. - М.: Физматгиз, 1962.- 358 с. 5. ГОСТ 8.011. Показатели точности измерений и формы представления результатов измерений. - М.: Издательство стандартов, 1973.- 5 с.

**УДК 621. 512. 011. 71**

## **ИНФОРМАЦИОННАЯ АДАПТИВНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

**Клещёв Г.М.**, канд. техн. наук., **Лисяной Г. В.** (г. Одесса, Украина)

*In clause the information adaptive model of an industrial complex with use of the mathematical device is described.*

**Введение.** Переход к серийному производству, в последнее время, позволяет применить системный подход, сохраняя гибкие, многономенклатурные методы обработки и обеспечивая возможность часто перестраивать производство, затрачивая

на это минимум времени.

В связи с этим возникла необходимость в технически гибких механизмах и автоматизированных информационных системах и технологиях управления, позволяющих повысить производительность при серийном производстве.

**Основные результаты работы.** На основании изложенного рассматривается системный подход представленный в виде геометрической модели промышленного комплекса, включающего и экономические системы управления. Ранее экономические системы их показатели не всегда учитывались. В рыночной экономике показатели этих систем являются основными: если прибыль не достаточная, нет рентабельности и экономии то от данного заказа необходимо отказаться.

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  $X = x_1, x_2, \dots, x_n$  – параметры входа;  $Z = z_1, z_2, \dots, z_n$  – параметры системы;  $Y = y_1, y_2, \dots, y_n$  – параметры выхода.

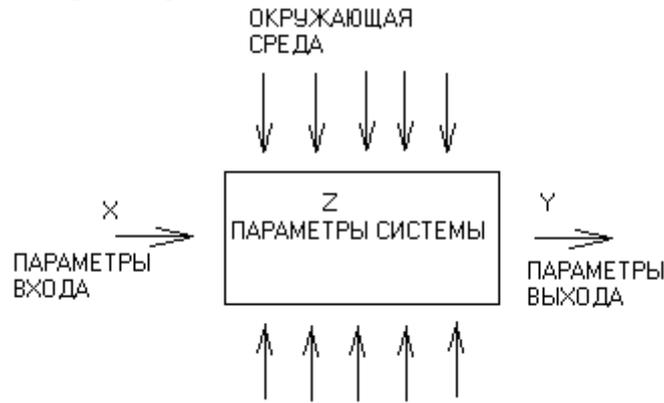


Рис. 1. Обобщённая система с основными характеристиками.

Выход и вход системы являются взаимозависимыми, между ними существует прямая причинно-наследственная связь, которая выявляется в функционировании системы. 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.

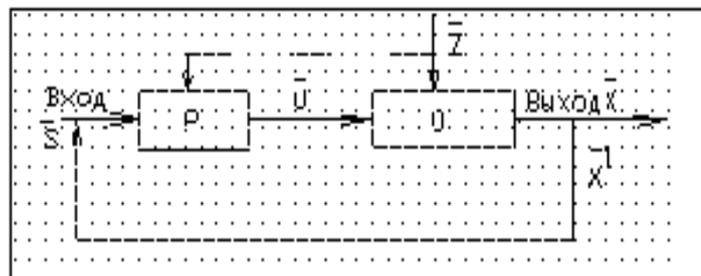


Рис. 2. Представлена упрощённая схема с обратной связью.

На рис. 2 приняты следующие обозначения:  $P$  – управляющий орган;  $U$  – управляющий вектор;  $O$  – управляемый (обрабатывающий) орган;  $S$  – вектор вход-

ных параметров;  $X$  – вектор выходных параметров;  $X^1$  – вектор обратной связи;  $Z$  – вектор внешних (изменяющихся) воздействий среды, который, в ряде случаев, удаётся предусмотреть некоторые из составляющих вектора  $Z$  (пунктирная линия на рисунке) и подать такое управляющее воздействие  $U$ , при котором компенсируется влияние помехи и выходная величина вектора  $X$  примет требуемое или оптимальное значение.

Любой из векторов состоит из  $N$ -го количества составляющих, например,  $S = (s_1, s_2, \dots, s_n)$  и т.д.

С учётом приведенных составляющих управляющий вектор  $U$  примет вид:  $U = F(S, X^1, Z, X)$  или  $U = F \{ (s_1, s_2, \dots, s_n), (x_1, x_2, \dots, x_n), (z_1, z_2, \dots, z_n), (x_1, x_2, \dots, x_n) \}$ . 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).

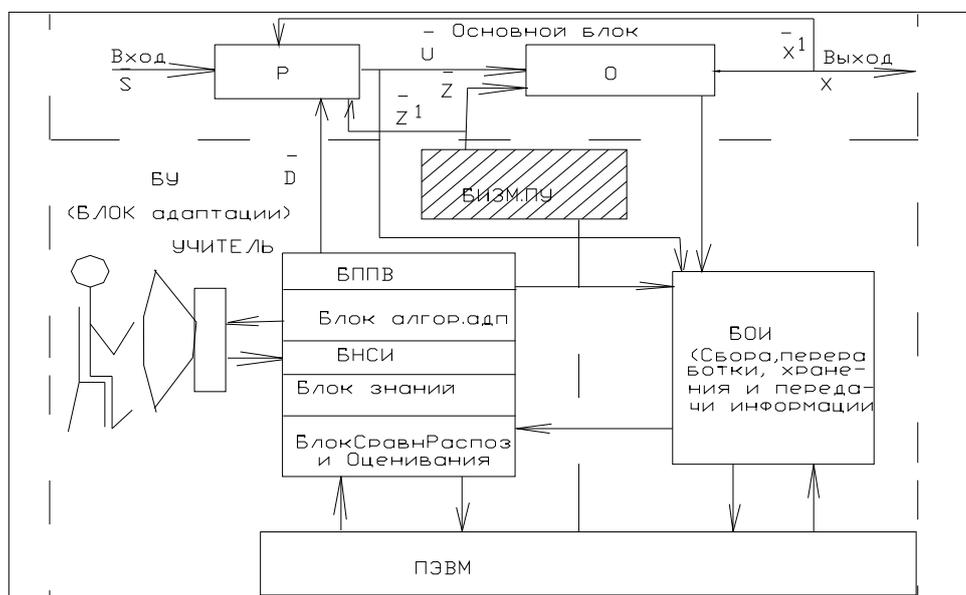


Рис. 3. Адаптивная модель проектирования и изготовления изделий.

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:

$$U = F(A, S); \quad A = \Psi(A^0, S, X, Z, D);$$

отсюда  $U = F[\Psi(A^0, S, X, Z, D) S]$ . Каждый вектор может быть представлен в виде матрицы, составляющими которой, в зависимости от рода помех, могут быть, например, следующие компоненты, где

$$D = \begin{bmatrix} d_{11}, d_{12}, d_{13}, \dots, d_{1n-1}, d_{1n} \\ d_{21}, d_{22}, d_{23}, \dots, d_{2n-1}, d_{2n} \\ \text{-----} \\ \text{-----} \\ \text{-----} \\ d_{m1}, d_{m2}, d_{m3}, \dots, d_{mn-1}, d_{mn} \end{bmatrix},$$

$d_{11}, d_{12}, d_{13}$  – 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 применяют пространственные матрицы.

Современные рыночные отношения, в основе которых лежат спрос и рынок сбыта, диктуют, что реализация будет обеспечена при наличии заказа, финансируемого конкретным заказчиком, при безусловном сбыте создаваемого программного и промышленного продуктов и получении гарантированной прибыли.

**Выводы.** Использование фрагментов адаптивной модели позволило разработать и внедрить на предприятиях стран СНГ и Украины десятки локальных систем по оптимальному раскрою, конструированию и подготовки управляющих программ для изготовления штампов. Получен значительный экономический эффект со сроками внедрения от 1,5 года до 0,6 лет.

По совокупности требований предъявляемым к системам, с учётом имеющегося опыта, можно предварительно оценить целесообразность использования информационной адаптивной модели.

**Литература:** 1. Клещев Г.М. Адаптивная система автоматизированного проектирования штампов. – Серия 6. “Технология тракторного и сельскохозяйственного машиностроения”. Экспресс-информация. – М., 1982. 2. Клещев Г.М. и др. Математическая модель теоретических основ создания автоматизированных интегрированных систем сельхозпроизводства. – V Ювiлейна мiжнародна науково-технiчна конференцiя. MOTROL’2005, Люблiн - Одеса, 2005. 3. Компакт диск – CD AutoCAD<sup>R</sup> (2000, 2002).

## ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО АГРЕГАТА КАК ОБЪЕКТА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Макурин Н.С., канд. техн. наук, (г. Харьков, Украина)

*The formalized description of the technological unit as object of functioning*

Формализованное описание технологического агрегата (ТА) как объекта функционирования предполагает под агрегатом некое специальное технологическое оборудование (СТО), реализующее основные технологические операции (ТО) при изготовлении объектов производства. Технологическую основу ТА, как средств автоматизации, составляют технологические процессы (ТП), организационную структуру которых задаем графом вида  $G = G(E, \Psi)$ , где  $E$  - множество элементов процесса,  $\Psi$  – совокупность связей между элементами.

При рассмотрении характера функционирования ТА во времени необходимо различать их надежность с двух позиций: связанную с отказом и восстановлениями самих ТА в процессе их функционирования и с отказами типа «ошибок», обуславливающих качество выпускаемых объектов производства.

Специфика отказов при анализе надежности функционирования ТА по производительности состоит в том, что отказ ТА трактуется как неспособность выполнения заданного объема работ. Специфика второго рода отказов при расчете надежности ТА состоит в том, что это такое состояние выходных характеристик ТА, при котором не обеспечиваются требуемые техническими условиями характеристики объектов производства. Причинами такого рода являются ошибки человека-оператора и средств технологического оснащения (СТО), а также изменение характеристик и режимов функционирования ТА во времени.

Технологические агрегаты можно рассматривать с позиций преобразования ими входных потоков продукции с определенными характеристиками в выходные потоки с другими характеристиками. С этих позиций все они обладают общими свойствами и представляют собой систему массового обслуживания приходящих на вход изделий.

Таким образом, входные и выходные потоки продукции ТА определяют материальные связи  $\Psi$  между ними. Считаем, что описание потоков продукции на входах и выходах ТА задается дискретным распределением вероятностей  $\{p_i(t_0, t_0 + t); i = \overline{0, \infty}\}$ , определяющих вероятность появления изделий за интервал времени  $[t_0, t_0 + t]$  или многомерной плотностью  $\omega(t_1, \dots, t_i)$  моментов времени  $t_1, \dots, t_i$  появления изделий. При независимости моментов появления вместо многомерной плотности  $\omega(t_1, \dots, t_i)$  будет использоваться одномерная плотность  $\omega(t)$  распределения времени между изделиями. Если  $t \in [0, T]$ , т. е. непрерывному интервалу, то поток считается непрерывным по времени, а если  $t \in \{t_k; k = \overline{0, \infty}\}$ , то дискретным по времени.

Детерминированные потоки характерны для АСТО с регламентированием, а случайные – для систем типа адаптивных АСТО, человеко-машинных систем.

Анализ реальных технологических систем позволяет определить характер движения материальных потоков между ТА и выделить два основных класса агрегатов: с регламентированным и нерегламентированным обслуживанием (тактом). Формализованное

лизованное описание моделей ТА – средство для определения количественных показателей использования типовых ТА, в том числе: производительности, надежности, показателей использования (коэффициентов загрузки), незавершенное производство, на основе которых может быть произведена оценка эффективности их функционирования. Учитывая, что процесс функционирования ТА имеет вероятностный характер, показатели функционирования определяются через вероятностные характеристики потоков материальной продукции, действующих на входе и выходе отдельных ТА: среднюю производительность  $m_n$  в единицу времени, рассчитываемую по формуле

$$m_n = \nu, \quad (1)$$

где  $\nu$  – интенсивность потока продукции на выходе ТА.

Производительность ТА с гарантированной вероятностью  $p_n$  рассчитывается по формуле

$$\Pi = N_0 / t, \quad (2)$$

где  $t$  – интервал времени, а  $p_n = \sum_{i=N}^{\infty} p_i(t_0, t_0 + t)$ ,  $p_i(t_0, t_0 + t)$  – вероятность появления на выходе ТА ровно  $i$  изделий за время от  $t_0$  до  $t_0 + t$ .

Коэффициент загрузки  $k_3$  определяется как доля времени, используемая для выполнения основных или вспомогательных ТО. Количественно  $k_3$  может быть определен по средним показателям (средний коэффициент загрузки  $\langle k_3 \rangle$ ) на основе выражения

$$\langle k_3 \rangle = \langle t_0 \rangle / t, \quad (3)$$

где  $\langle t_0 \rangle$  – среднее время выполнения ТО, а также на основе выражения

$$k_3(t) = \sum_{i=1}^{\infty} p_i(t_0, t_0 + t) = 1 - p_0(t_0, t_0 + t), \quad (4)$$

определяющего долю времени, в течение которого ТА был загружен. Среди показателей, задающих незавершенное производство, т. е. число изделий, проходящих ТО, можно выделить показатель среднего числа изделий незавершенного производства, рассчитываемый по формуле

$$\langle m_{н.н}(t) \rangle = \sum_{i=1}^{\infty} i p_i(t_0, t_0 + t), \quad (5)$$

или число изделий  $N_{н.н}$ , находящихся в незавершенном производстве с доверительной вероятностью  $p_{н.н}$ , которое равно

$$m_{н.н} = N_{н.н}, \quad (6)$$

где  $p_{н.н}(t) = \sum_{i=N_{н.н}}^{\infty} p_i(t_0, t_0 + t)$ . (7)

В реальных производственных условиях наиболее частый случай имеет место

процесс функционирования ТА с нерегламентированным тактом и потому представляет наибольший интерес с точки зрения его поведения.

Технологический агрегат с нерегламентированным тактом функционирования, как СМО, в общем случае характеризуется произвольным (не пуассоновским) входным потоком изделий и временем изготовления, отличным от экспоненциального, что подтверждается результатами статистических исследований, проведенных на ряде предприятий промышленности.

При описании функционирования группы ТА воспользуемся методами фаз и псевдосостояний. Для этого предварительно представим процесс поступления изделий на обработку разбитым на несколько псевдосостояний. Совокупность псевдосостояний поступлений, характеризуемая случайным временем  $\tilde{t}_i \quad i = \overline{1, n}$ , определяет суммарное время  $\tilde{t}$  равное

$$\tilde{t} = \sum_{i=1}^n \tilde{t}_i, \quad (8)$$

которое является временем поступления пачек на входном потоке. Будем считать, что распределение  $\tilde{\omega}_\eta(t)$  времени  $\tilde{t}$  известно и по нему можно определить плотности распределения  $\tilde{\omega}_i(t, \lambda_i)$  компонентов  $t_i$ , которые будем считать экспоненциальными с параметрами  $\lambda_i, i = \overline{1, n}$ .

Процесс изготовления изделия на  $i$ -м ТА также представим в виде нескольких фаз обслуживания, таких, что время изготовления  $t_{i,j}$ ,  $j$ -й фазы распределено экспоненциально  $\omega_{i,j}(t; \mu_{i,j})$  с параметром  $\mu_{i,j}$ . Суммарное время изготовления  $t_i$ , равное

$$t_i = \sum_{j=1}^m t_{i,j}, \quad (9)$$

где  $m$  – число фаз описывается известной плотностью распределения  $\omega_i(t); i = \overline{1, n}$ . Принимаем, что существует и известно распределение случайного времени  $t_i$  заданного плотностью  $\omega_i(t)$  на фазы  $t$  с экспоненциальными плотностями  $\omega_{i,j}(t; \mu_{i,j})$ , с параметрами  $\mu_{i,j}$ , определяющими интенсивность обслуживания  $j$ -й фазы на ТА.

Определим состояние системы  $E_i(k, r)$  как состояние, при котором в системе имеется  $i$  изделий,  $k$  – номер псевдосостояния  $(i+1)$ -го изделия, поступающего на обслуживание,  $k = \overline{1, n}$ ;  $r$  – фаза изготовления  $(i+1)$ -го изделия,  $r = \overline{1, m}$ . Систему дифференциальных уравнений, описывающих изменение вероятностей состояний, можно задать в виде:

для  $i = 0$

$$\begin{aligned} \frac{dp_0(n, m)}{dt} &= -\lambda_1 p_0(n, m) + \mu_{(1)m} p_0(n, m-1); \\ \frac{dp_0(1, m)}{dt} &= -\lambda_2 p_0(1, m) + \lambda_1 p_0(n, m) + \mu_{(1)m} p_0(1, m-1); \end{aligned} \quad (10)$$

...

$$\frac{dp_0(n-1, m)}{dt} = -\lambda_n p_0(n-1, m) + \lambda_{n-1} p_0(n-2, m) + \mu_{(1)m-1} p_0(n-1, m-1);$$

$$\frac{dp_0(n, m-1)}{dt} = -(\mu_{(1)m} + \lambda_1) p_0(n, m-1) + \mu_{(1)m-1} p_0(n, m-2);$$

$$\frac{dp_1(n, m)}{dt} = -(\mu_{(1)1} + \lambda_1) p_1(n, m) + \mu_{(1)m} p_1(n, m-1);$$

...

для  $i = m_0 - 1$

$$\frac{dp_{m_0-1}(n, 1)}{dt} = -(\mu_{(m_0-1),2}) p_{m_0-1}(n, 1) + \mu_{(m_0-1),1} p_{m_0}(n, m); \quad (11)$$

для  $i \geq m_0$

$$\frac{dp_i(n, m)}{dt} = -(\lambda_1 + \mu_{(i),1}) p_i(n, m) + \lambda_n p_{i-m_0}(n-1, m) + \mu_{(i+1)m} p_{i+1}(n, m);$$

$$\frac{dp_i(1, m)}{dt} = -(\lambda_2 + \mu_{(i)1}) p_i(1, m) + \lambda_1 p_i(n, m) + \mu_{(i+1)m} p_i(1, m);$$

...

$$\frac{dp_i(n-1, m)}{dt} = -(\lambda_{n-1} + \mu_{(i)1}) p_i(n-1, m) + \lambda_{n-1} p_i(n-2, m) + \mu_{(i+1)m} p_i(n-1, m-1);$$

$$\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{r=1}^m p_j(k, r) = 1.$$

Системы дифференциальных уравнений решаются на ЭВМ на основе стандартных программ. При необходимости получения решений в стационарных режимах необходимо левую часть системы приравнять к нулю.

Используя, полученные в ходе решения системы дифференциальных уравнений, значения вероятностей  $p_i(k, r)$ ;  $i = \overline{0, \infty}$ ;  $r = \overline{1, m}$ ;  $k = \overline{1, n}$ , можно определить такие показатели эффективности функционирования ТА, как коэффициент загрузки и показатель незавершенного производства.

На основе анализа процессов функционирования типовых ТА можно построить систему дифференциальных уравнений, аналогичную (11), решив которую, можно определить  $\{E_i(k, r); \tilde{E}_i(k, r); k = \overline{1, n}; r = \overline{1, m}\}$  вероятности соответствующих состояний, найти интенсивность выходного потока и определить все показатели эффективности функционирования ТА по выражениям (1) – (7).

**Литература:** 1. Объективная технология моделирования информационных и организационных систем: Учеб. пособие / М.Ф. Бондаренко, А.Е. Соловьева и др. – МОН Украины, НМЦВО, ХНУРЭ. – Харьков: ХНУРЭ, 2005. – 160 с. 2. Борисенко О.А. Керуючі системи: Навч. посібник / МОН України, СДУ. – К.: ЦУЛ, 2004. – 216 с.

## ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ ЭЛЕМЕНТА КОМПЕНСАЦИИ ПО НАГРУЗКЕ НА ТЯГОВУЮ ОШИБКУ СЛЕДЯЩЕГО ГИДРОПРИВОДА

Тихенко В.Н., канд. техн. наук, Волков А.А. (г. Одесса, Украина)

*Features of a design of a hydraulic servo drive with an additional feedback on loading are considered. Dependences of a relative mistake of tracking on relative loading for various values of rigidity of an element of indemnification are resulted*

В следящих гидроприводах возможно обеспечить повышение эксплуатационных характеристик за счет введения дополнительной обратной связи по нагрузке для компенсации тяговой ошибки слежения [1].

Рассмотрим упрощенную конструктивную схему следящего гидропривода с однокромочным золотником и дифференциальным гидроцилиндром (рис. 1). Рабочая жидкость под давлением  $p_n$  подводится в штоковую полость цилиндра 1, который перемещает исполнительный орган 2. В корпусе 5 размещены следящий золотник 4 и его неподвижная втулка 3, а также закрепленная по контуру упругая мембрана 6, центральная часть которой связана с подвижной втулкой 7.

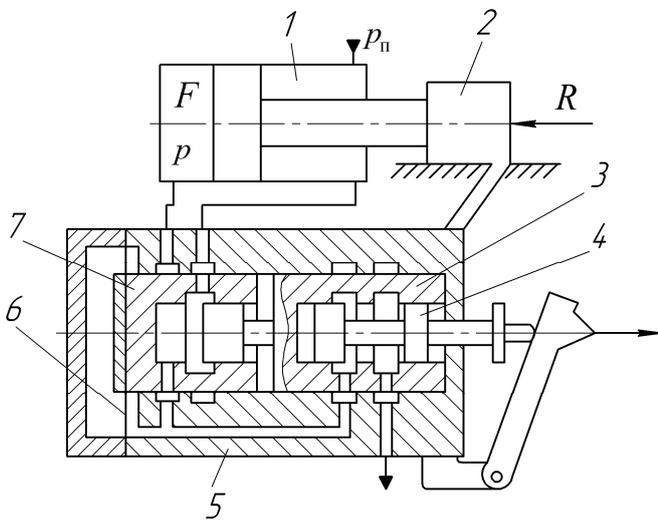


Рис. 1. Схема следящего гидропривода с устройством компенсации по нагрузке.

Штоковая полость связана с поршневой через дросселирующую щель, которая образована рабочими кромками подвижной втулки 7 и левого фланца неподвижной втулки 3. Поршневая полость цилиндра соединена со сливом через дросселирующую щель следящего золотника, а через канал в корпусе 5 - с полостью упругой мембраны 6. В полость слева от мембраны через регулируемый демпфер подведено давление  $p_n$  (канал и демпфер на схеме не показаны).

При равенстве расходов жидкости, протекающей через указанные выше щели, гидроцилиндр неподвижен. При повышении нагрузки  $R$  возрастает давление  $p$ , которое воздействует на мембрану и приводит к смещению втулки 7 пропорционально величине  $R$ . При соответствующем выборе жесткости мембраны обеспечивается сохранение баланса расходов жидкости в поршневой полости, то есть компенсация тяговой ошибки. По известной методике [2] путем совместного решения уравнений неразрывности потока и уравнения равновесия можно получить выражение для определения относительного рассогласования (ошибки слежения)  $\bar{\varepsilon}$  от относительной нагрузки  $\bar{R}$ :

$$\bar{\varepsilon} = 1 + \frac{\bar{v}}{\sqrt{1 + 2\bar{R}}} + \frac{1 + 2c\bar{R}}{1 + 2\bar{R}} \sqrt{1 - 4\bar{R}^2}, \quad (1)$$

где  $c$  – постоянный коэффициент, величина которого зависит от жесткости элемента компенсации по нагрузке (в данном случае – мембраны 6).

На основании уравнения (1) получены статические характеристики  $\bar{\varepsilon} = f(\bar{R})$  следящего ГП с обратной связью по нагрузке при различных значениях  $c$  (рис. 2).

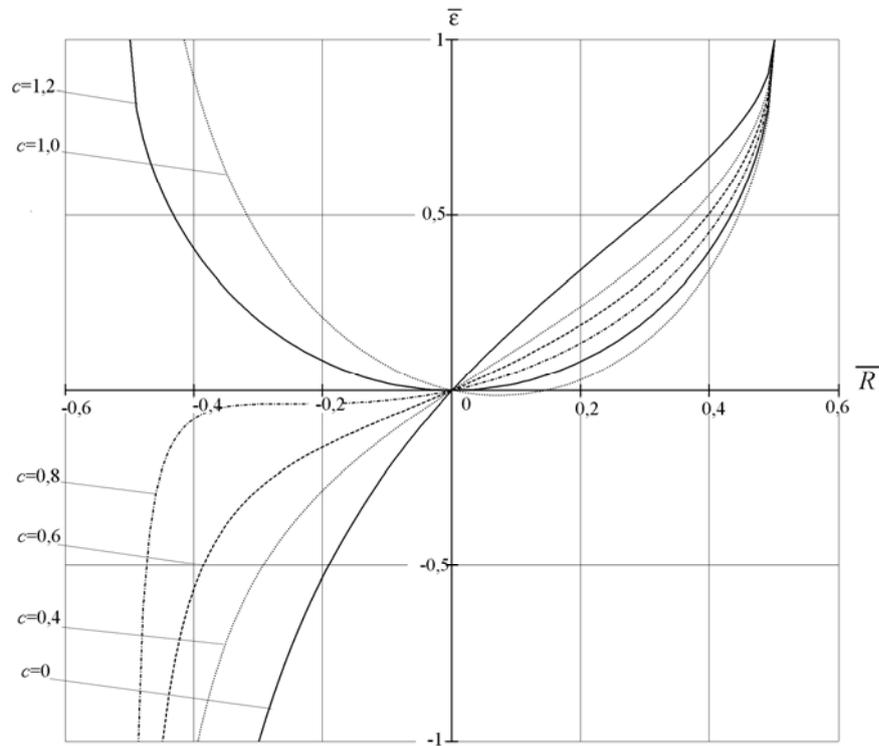


Рис. 2. Зависимость относительного рассогласования  $\bar{\varepsilon}$  от относительной нагрузки  $\bar{R}$  при различных значениях жесткости  $c$  элемента компенсации по нагрузке.

При  $c = 0$  (обратная связь по нагрузке отсутствует) кривая соответствует аналогичной тяговой характеристике для традиционной схемы. При недокомпенсации нагрузки ( $c < 1$ ) тяговая ошибка слежения снижается, а при соблюдении условия компенсации ( $c = 1$ ) характеристика приобретает вид параболы симметричной относительно положительной части оси  $\bar{\varepsilon}$ . В случае перекомпенсации ( $c > 1$ ) парабола смещается вправо и на небольшом участке ( $0 < \bar{R} < 0,15$ ) ошибка  $\bar{\varepsilon} \leq 0$ . Следует отметить, что ошибка слежения в рабочем диапазоне нагрузок  $-0,3 < \bar{R} < 0,3$  даже при отклонениях от условия компенсации ( $0,8 < c < 1,2$ ) значительно меньше, чем для традиционной схемы ( $c = 0$ ).

**Литература:** 1. Тихенко В. Н., Волков А. А. Исследование следящих гидроприводов с обратными связями по нагрузке // Сборник научных трудов Кировоградского техн. ун-та. – Кировоград, 2000, вып. 7. – С. 115-119. 2. Тихенко В. Н. Исследование точности воспроизведения гидравлического следящего привода // Труды Одесского политехн. ун-та. – Одеса, 2000, вып. 2(11). – С. 19-22.

**УДК621.923**

## **УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА ПРИ ПРЕРЫВИСТОМ ЗУБОШЛИФОВАНИИ**

**Якимов А.А.**, канд. техн. наук ( г. Одесса, Украина)

*In work conditions of occurrence of a parametrical resonance are formulated at faltering grinding cogwheels.*

Периодичность изменения возмущающей силы в режиме прерывистого шлифования зубчатых колес приводит к изменению жесткости упругой системы по времени (рис. 1).

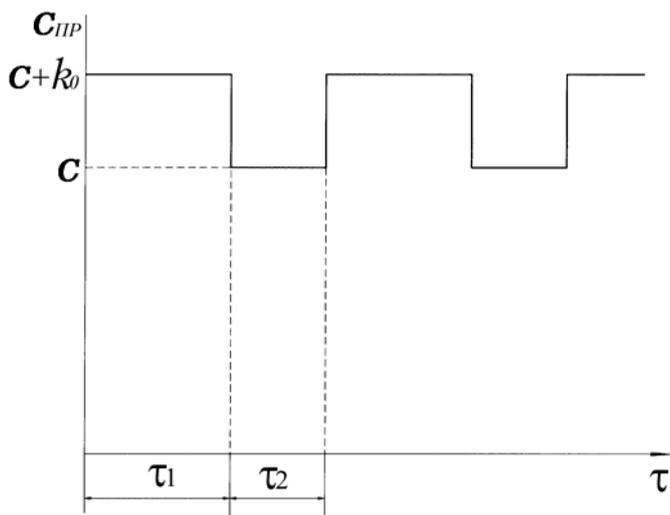


Рис. 1. Изменение жесткости упругой системы зубошлифовального станка при прерывистом шлифовании.

В момент контакта режущего выступа с обрабатываемой деталью жесткость упругой системы равна  $C + k'_0$ , а в момент разрыва, процесса резания —  $C$ . Жесткость  $C$  характеризует свойства упругой системы станка в разомкнутом состоянии и определяется его конструкцией, а также условиями сопряжения его элементов. Статическая жесткость резания  $k'_0 = C \cdot \left( \frac{t_{л}}{t} - 1 \right)$ , где  $t_{л}$  — заданная по лимбу станка глубина резания;  $t$  — истинный сьем металла.

Соответствующие колебания называют параметрически возбуждающими. Опасность представляют колебания с возрастающими амплитудами. Они приводят к параметрическому резонансу. Установлено, [1] что чем больше интервал изменения жесткости, тем шире область неустойчивых режимов шлифования. Для выявления потенциально возможных областей возникновения параметрического резонанса рассмотрим одномассовую систему в установившемся режиме.

При прерывистом зубошлифовании движение системы описывается уравнением:

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + C'y = (F - k'_0 y)f(\tau), \quad (1)$$

где  $f(\tau) = \begin{cases} 1, & \text{если } 0 < \tau < \tau_1 \\ 0, & \text{если } \tau_1 < \tau < (\tau_1 + \tau_2) \end{cases}$ .

Дифференциальные уравнения движения системы в период контакта выступа с обрабатываемой деталью и разрыва процесса резания имеют вид:

$$\begin{cases} m_{np}\ddot{y}_1 + b\dot{y}_1 + C'y_1 = -k'_0 y_1 \\ m_{np}\ddot{y}_2 + b\dot{y}_2 + C'y_2 = 0 \end{cases}. \quad (2)$$

Таким образом, движение системы описывается двумя уравнениями с различными коэффициентами при координате  $y$ . В данном случае переменный коэффициент при координате  $y$  изменяется по закону прямоугольного синуса (рис. 1) с периодом  $\tau_1 + \tau_2$ . В течение времени  $\tau_1 + \tau_2$  уравнения имеют постоянные коэффициенты. Решение системы уравнений (2) примет вид:

$$\begin{cases} y_1 = e^{-\eta\tau} [A \sin(\omega_1\tau) + B \cos(\omega_1\tau)] \\ y_2 = e^{-\eta\tau} [M \sin(\omega_2\tau) + D \cos(\omega_2\tau)] \end{cases} \quad (3)$$

где  $\omega_1 = \sqrt{\frac{C + k'_0}{m} - \eta^2}$ ;  $\omega_2 = \sqrt{\frac{C}{m} - \eta^2}$ ;  $m$  — приведенная масса;  $\eta = \frac{k'_0 \cdot C^2 \cdot t_{л}^2}{(C + k'_0)^2 \cdot m}$  —

коэффициент затухания;  $k'_0 = C \cdot \left( \frac{t_n}{t} - 1 \right)$ .

Для определения постоянных  $A, B, M, D$  необходимо учесть граничные условия. Два условия отнесем к моменту времени  $\tau_1$ :

$$y_1(\tau_1) = y_2(\tau_2); \quad \dot{y}_1(\tau_1) = \dot{y}_2(\tau_2) \quad (4)$$

два других условия – к моменту времени  $(\tau_1 + \tau_2)$ :

$$\lambda_0 y_1(0) = y_2(\tau_1 + \tau_2); \quad \lambda_0 \dot{y}_1(0) = \dot{y}_2(\tau_1 + \tau_2), \quad (5)$$

где  $\lambda_0$  – некоторое постоянное число.

После подстановки граничных условий (4) и (5) в уравнение (1) имеем:

$$\begin{cases} e^{-\eta\tau_1} [A \sin(w_1\tau_1) + B \cos(w_1\tau_1)] = e^{-\eta\tau_2} [M \sin(w_2\tau_2) + D \cos(w_2\tau_2)] \\ e^{-\eta\tau_1} [Aw_1 \cos(w_1\tau_1) - Bw_1 \sin(w_1\tau_1)] = e^{-\eta\tau_2} [w_2M \cos(w_2\tau_2) - w_2D \sin(w_2\tau_2)] \\ \lambda_0 [A \sin 0 + B \cos 0] = e^{-\eta(\tau_1+\tau_2)} [M \sin w(\tau_1 + \tau_2) + D \cos w(\tau_1 + \tau_2)] \\ \lambda_0 [A \cos 0 - B \sin 0] = e^{-\eta(\tau_1+\tau_2)} [wM \cos w(\tau_1 + \tau_2) - wD \sin w(\tau_1 + \tau_2)] \end{cases} \quad (6)$$

После определения постоянных АВМД из системы уравнений (6) и постановки их в уравнения (3) получено решение:

$$\lambda_0^2 - 2\lambda \cdot \left\{ \frac{1}{2} e^{-\eta(\tau_1+\tau_2)} \left[ \frac{w_1^2 + w_2^2}{w_1 w_2} \sin(w_1\tau_1) \sin(w_2\tau_2) - 2 \cos(w_1\tau_1) \cos(w_2\tau_2) \right] \right\} + e^{-2\eta(\tau_1+\tau_2)} \quad (7)$$

Решение (7) можно представить в виде следующего квадратного уравнения:

$$\lambda_0^2 - 2 \cdot L' \cdot \lambda_0 + P' = 0, \quad (8)$$

где  $L' = \frac{1}{2} e^{-\eta(\tau_1+\tau_2)} \left[ \frac{w_1^2 + w_2^2}{w_1 w_2} \sin(w_1\tau_1) \sin(w_2\tau_2) - 2 \cos(w_1\tau_1) \cos(w_2\tau_2) \right]$ ;

$$P' = e^{-2\eta(\tau_1+\tau_2)}; \quad \tau_1 = \frac{l_1}{V_{kp}}; \quad \tau_2 = \frac{l_2}{V_{kp}}.$$

Корни этого квадратного уравнения определяются из выражения:

$$\lambda_{0,2} = L' \pm \sqrt{L'^2 - P'}. \quad (9)$$

Для того чтобы  $\lambda_{01}$  и  $\lambda_{02}$  были действительными числами, должно соблюдаться неравенство  $L'^2 > P'$ . Если  $|\lambda_0| > 1$ , то колебания в каждом периоде усиливаются, а если  $|\lambda_0| < 1$ , то они будут постепенно затухать. Условие неустойчивости

$|\lambda_0| > 1$  можно записать так  $L' > \frac{1+P'}{2}$ :

$$L' = \frac{1}{2} e^{-\eta \left( \frac{l_1}{V_{kp}} + \frac{l_2}{V_{kp}} \right)} \cdot \left[ \frac{\left( \frac{2C + k'_0}{m} \right)}{\left( \sqrt{\frac{C + k'}{m}} - \eta^2 \right) \cdot \left( \sqrt{\frac{C}{m}} - \eta^2 \right)} \right] \times$$

$$\begin{aligned} & \times \sin\left(\sqrt{\frac{C+k'_0}{m}-\eta^2} \cdot \frac{l_1}{V_{kp}}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{C}{m}-\eta^2} \cdot \frac{l_2}{V_{kp}}\right) - \\ & - 2\cos\left(\sqrt{\frac{C+k'_0}{m}-\eta^2} \cdot \frac{l_1}{V_{kp}}\right) \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{C}{m}-\eta^2} \cdot \frac{l_2}{V_{kp}}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

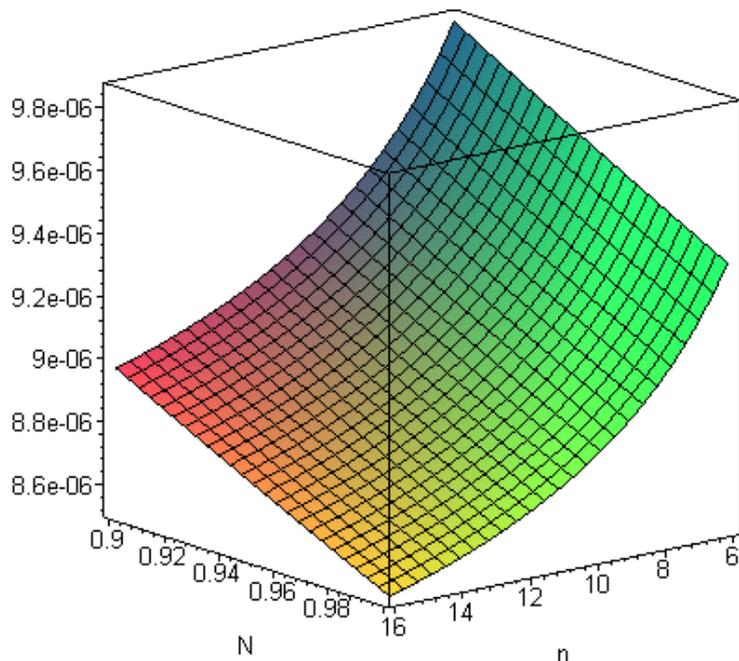


Рис. 2. Поверхность разделяющая зоны устойчивой и неустойчивой работы зубошлифовального станка. При  $\lambda_0 = 1$ ;  $k'_0 = 6 \cdot 10^6$  н/м;  $D_{kp} = 0,2$  м;  $tl = 0,00010$  м.

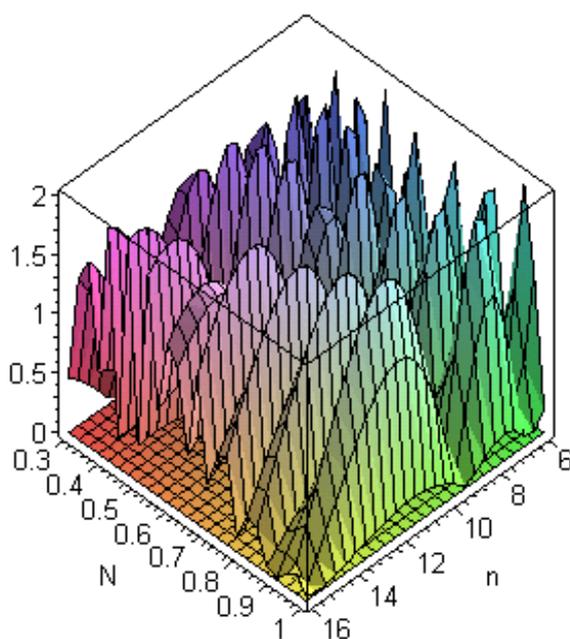


Рис. 3. Зависимость параметра  $\lambda_0$  от числа режущих выступов и отношения  $l_2/l_1$  при  $k'_0 = 16 \cdot 10^6$  н/м;  $D_{kp} = 0,25$  м;  $tl = 0,00010$  м.

Область неустойчивой работы упругой системы зубошлифовального станка, как видно из выражения (10) зависит от геометрических параметров прерывистого круга  $l_1$  и  $l_2$ , от числа режущих выступов “ $n$ ” и от обобщенного показателя шлифования  $k'_0$ . Используя пакет прикладных программ “MAPLE 9.5”, были произведены расчеты зависимости параметра  $\lambda_0$  от отношения параметров круга  $l_2/l_1$ , числа режущих выступов “ $n$ ” и параметра  $k'_0$ .

На рис. 2 представлена поверхность, разделяющая зоны устойчивой и неустойчивой работы станка при  $\lambda_0 = 1$ ;  $k'_0 = 6 \cdot 10^6$  н/м;  $D_{kp} = 0,2$  м. С уменьшением числа режущих выступов в интервале 16-6 амплитуда колебаний шпинделя возрастает, увеличивается вероятность возникновения параметрического резонанса.

На рис. 3 представлена зависимость параметра  $\lambda_0$  от числа режущих выступов и от отношения параметров прерывистого круга  $l_2/l_1$ . Горизонтальная секущая плоскость, проведенная через точку  $\lambda_0 = 1$ , выделяет

зоны неустойчивой работы станка ( $2L > 1 + P$ ).

Проведенные исследования показали, что вероятность возникновения параметрического резонанса зависит от жесткости упругой системы  $k'_0$  и геометрических параметров прерывистого круга. Результаты исследования полученной зависимости  $\lambda_0 = \varphi(l_2/l_1)$  (рис. 3) позволяют сделать качественную оценку вероятности возникновения параметрического резонанса. Однако, полученная зависимость  $\lambda_0 = \varphi(l_2/l_1)$  в интервале изменения  $l_2/l_1$  от 0,3 до 1,0 не позволяет определить границы, очерчивающие области неустойчивой работы станка.

Для более детального изучения областей неустойчивой работы станка при  $\lambda_0 > 1$  и  $\frac{2L}{1+P} \geq 1$  следует шкалу  $l_2/l_1$  разбить на отдельные, более мелкие участки, например:  $l_2/l_1 = 0,3 \div 0,4$ ;  $0,4 \div 0,5$ ;  $0,5 \div 0,6$ ;  $0,6 \div 0,7$ ;  $0,7 \div 0,8$ ;  $0,8 \div 0,9$ ;  $0,9 \div 1,0$ . Такое разбиение позволяет свести к минимуму число рядов в направлении оси  $l_2/l_1$  и в каждом ряду определить границы областей неустойчивой работы станка.

На рис. 4 представлена зависимость параметра  $\lambda_0$  от числа режущих выступов в диапазонах изменения шкалы: а)  $l_2/l_1 = 0,3 \div 0,4$ ; б)  $l_2/l_1 = 0,9 \div 1,0$ ; при  $k'_0 = 6 \cdot 10^6$  н/м;  $D_{kp} = 0,2$  м;  $t_{л} = 0,0001$  м.

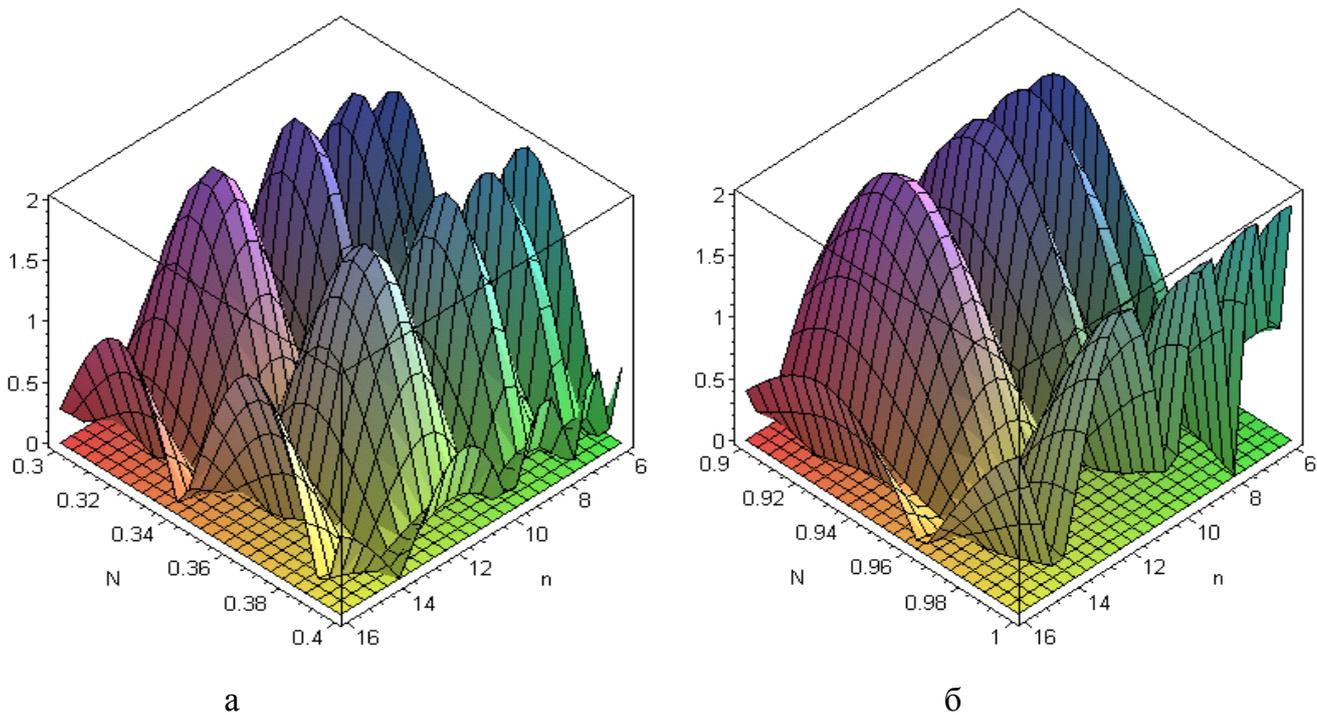


Рис. 4. Зависимость параметра  $\lambda_0$  от числа режущих выступов и отношения  $l_2/l_1$  при  $k'_0 = 16 \cdot 10^6$  н/м;  $D_{kp} = 0,25$  м;  $t_{л} = 0,00010$  м в диапазоне изменения  $l_2/l_1$ : а) от 0,3 до 0,4 и б) от 0,9 до 0,1.

Из анализа приведенных зависимостей  $\lambda_0 = \varphi(N)$  видно, что отношение параметров  $l_2/l_1$  оказывает существенное влияние на характер изменения зависимости  $\lambda_0 = \varphi(n)$ . Полученные расчетные зависимости  $\lambda_0 = \varphi(l_2/l_1, k'_0, D_{kp})$  позволили установить очерчивающие границы зон, в которых при шлифовании прерывистым кругом определенной характеристики возникает параметрический резонанс. На рис.

5 представлены зоны неустойчивой работы зубошлифовального станка при  $N = 0,4$ ;  $D_{кр} = 0,2$ ;  $n = 8, 10, 12, 14, 16$ .

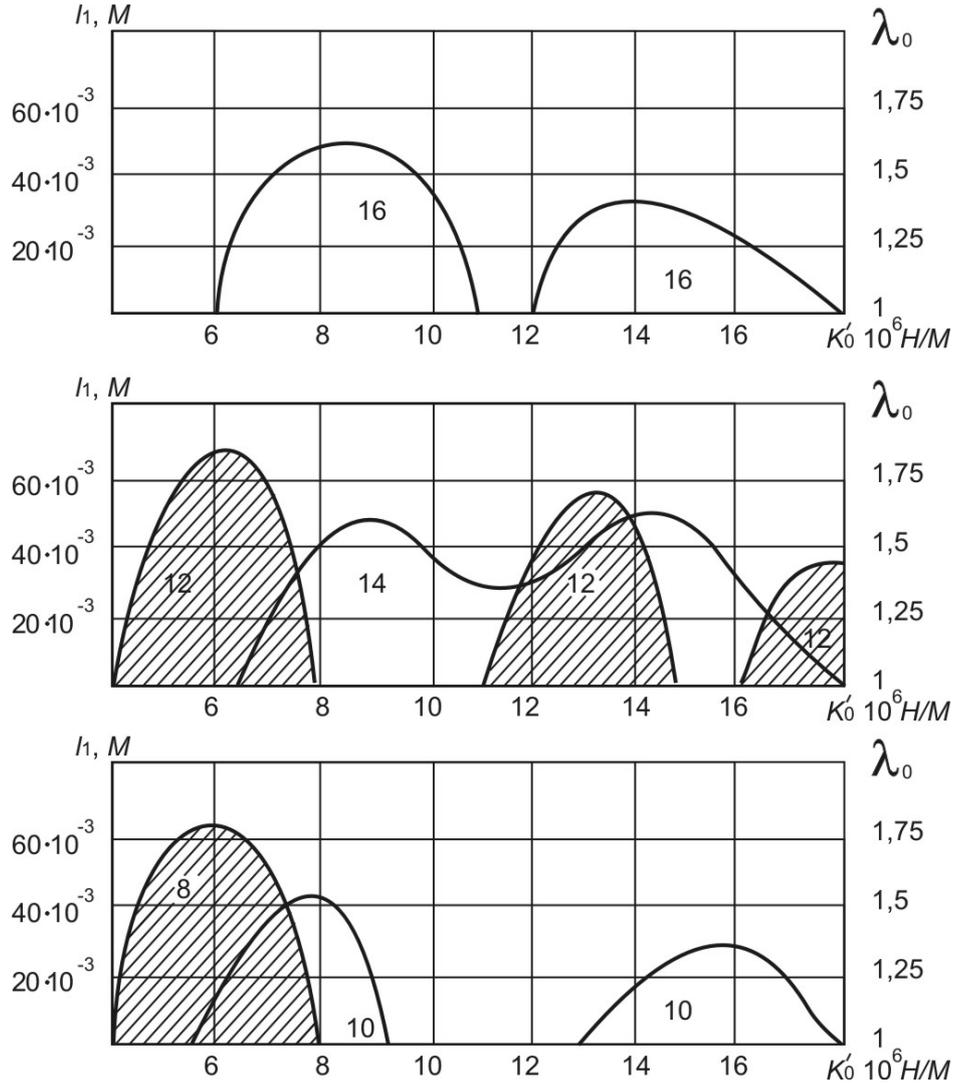


Рис. 5. Области неустойчивой работы зубошлифовального станка при  $N=0,4$ ;  $D_{кр}=0,2$ м.

Аналогичные зоны неустойчивой работы станка построены для  $N = 0,6$ ;  $0,8$ ;  $0,9$ ;  $1,0$ . Произведены расчеты параметров  $l_1$  и  $l_2$ . В таблице представлены расчетные значения параметров прерывистых кругов.

Таблица

$n$	6	8	10	12	14	16
$l_2/l_1 = 0,4$						
$l_1$ , мм	75	56	44,8	37	32	28
$l_2/l_1 = 0,5$						
$l_1$ , мм	70	52	42	35	30	26
$l_2/l_1 = 0,6$						
$l_1$ , мм	65	49	39	33	28	24,6
$l_2/l_1 = 0,9$						
$l_1$ , мм	55	41	33	27	23	20

**Литература:** 1. Управление процессом шлифования // А.В. Якимов, А.Н. Паршаков, В.П. Ларшин и др. – К.: Техника, 1983. – 184 с.

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТАНОЧНОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ОТДЕЛКИ СОПРЯЖЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗАГОТОВКИ И ИНСТРУМЕНТА

Уминский С.М., канд. техн. наук, Якимов А.А., канд. техн. наук  
(г. Одесса, Украина)

*The way of reception of longitudinal updating tools is described / sheving without use special adaptations and has attached. The settlement dependences for definition of a corner of axes submission are given which provide achivem-ent of longitudinal upadpting tools.*

Зубчатая передача – один из наиболее распространенных узлов в конструкции современных механизмов и машин. Производство и выпуск зубчатых колес налажено во всех отраслях машиностроения. Более 70% всех выпускаемых зубчатых колес составляют колеса повышенной точности, зубчатый венец которых проходит финишную обработку. В настоящее время требования повышения производительности, точности и качества обработки, необходимость снижения трудоемкости обеспечили широкое распространение финишной обработки зубчатых венцов методами свободного обката при скрещающихся осях – шевингованием и хонингованием.

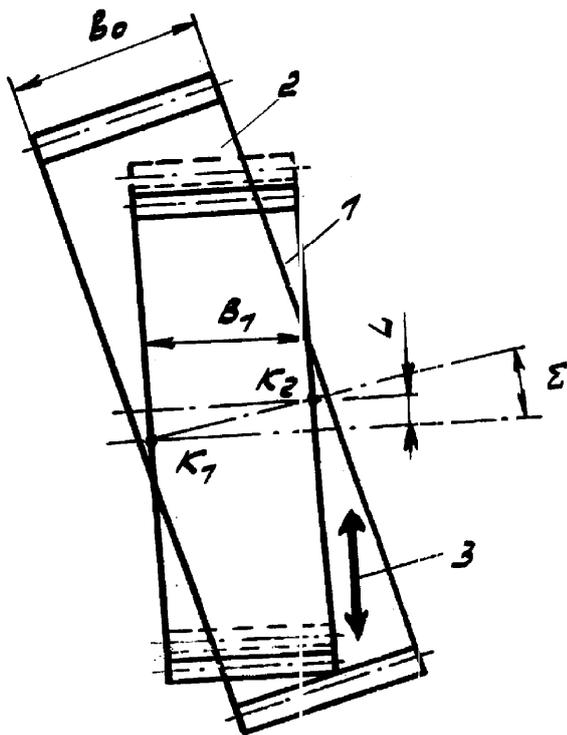


Рис.1. Схема тангенциального шевингования.

При таком методе отделки центр скрещивания перемещается вдоль поверхности зуба шевера, вследствие чего износ режущих кромок происходит равномерно, стойкость инструмента повышается. Значительные усилия, возникающие при обработке, вызывают упругие деформации элементов технологической системы, величина деформаций элементов технологической системы уменьшается с увеличением числа проходов. При сближении шевера и обрабатываемого колеса в результате радиальной подачи образуется пятно контакта, кроме того в процессе обработки форма и размеры зуба обрабатываемого колеса постоянно меняются, что приводит к постоянному изменению

подавляющее большинство зубчатых колес, производимых в автотракторной промышленности, авиастроении и станкостроении обрабатывают с помощью таких операций. Наивысшую производительность отделки обеспечивают способы шевингования с подачей инструмента под углом к оси заготовки [1]. В настоящее время в машиностроении получили распространение пять методов шевингования зубчатых колес – продольное, диагональное, тангенциальное, «короткого хода» и врезное. Метод тангенциального шевингования характеризуется наличием касательной подачи, направленной перпендикулярно оси обрабатываемого колеса (рис. 1).

условий контакта рабочих поверхностей шевера и заготовки [2, 3].

Это приводит к изменению положения центра скрещивания в процессе обработки и как следствие возникновению погрешности направления зуба. Кроме того, при определении параметров настройки и расчете ширины венца инструмента необходимо учитывать наряду с геометрическими параметрами станочного зацепления их изменения, возникающие в результате переточек инструмента. В период врезания шевера в обрабатываемую заготовку величина удаляемого припуска максимальна, что приводит к увеличению пятна контакта в процессе обработки. Далее за счет увеличения пятна контакта, усилия резания достигают своих максимальных значений, и дальнейшего внедрения режущих зубцов шевера в обрабатываемую заготовку не происходит. В этот период шевер своим делительным цилиндром перекачивается по делительному цилиндру обрабатываемой заготовки. В начале рабочего хода угол скрещивания осей шевера и заготовки  $\Sigma'$  не равен расчетному углу скрещивания  $\Sigma$  (имеет место перекося осей шевера и заготовки), а образующая делительного цилиндра шевера составляет угол  $\Delta V$  (непараллельность осей), то есть имеет место комбинированный перекося осей заготовки и инструмента [4].

Расчетные зависимости для определения угла непараллельности осей, перекося осей шевера и заготовки имеют вид:

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

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

где  $r_1$  - радиус делительной окружности заготовки, мм;  $r_0$  - радиус делительной окружности шевера, мм;  $\Delta \alpha$  - изменение положения центра скрещивания осей заготовки, и инструмента, мм.

В процессе обработки тангенциальным шевингованием наибольшего значения угол  $\Delta V$  достигает при врезании и выходе шевера и приближается к нулевому значению при максимальных деформациях технологической системы. Длина пятна контакта в этом случае уменьшается, что приводит к врезанию режущих зубцов шевера на большую глубину в начале и конце цикла обработки. Длина пятна контакта является функцией параметров станочного зацепления, а для случая обработки тангенциальным методом шевингования длина линии контакта будет составлять не менее половины ширины зуба заготовки [5, 6]. Погрешность направления зуба в этом случае определяется по зависимости:

$$F_\beta = b_1 \operatorname{tg} \alpha_n \sin \Sigma \sqrt{\frac{\Delta \alpha (2(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1) - \cos^2 \Sigma)}{(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1)(1 + \operatorname{tg}^2 \Sigma)(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1 - \Delta \alpha \cos^2 \Sigma)}}, \quad (3)$$

где  $F_\beta$  - погрешность направления зуба, мм;  $\alpha_n$  - нормальный угол зацепления, град;  $b_1$  - ширина зубчатого венца заготовки, мм;  $\Delta V$  - величина угла не параллельности осей, град.

Приведенные на рис. 2 и рис. 3 графики показывают изменение погрешности направления зуба в зависимости от радиуса делительной окружности заготовки и изменения расчетного угла скрещивания осей.

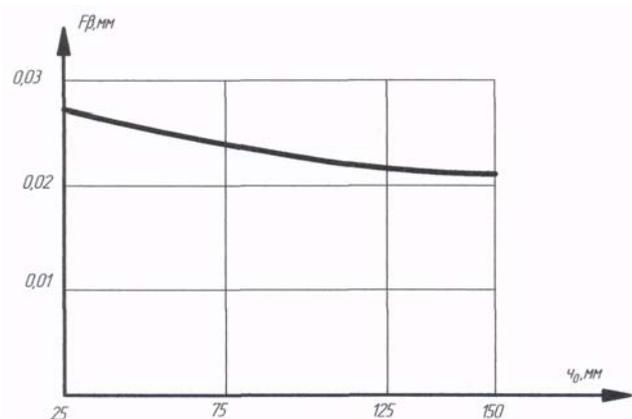


Рис. 2. Погрешность направления зуба в зависимости от радиуса делительной окружности заготовки.

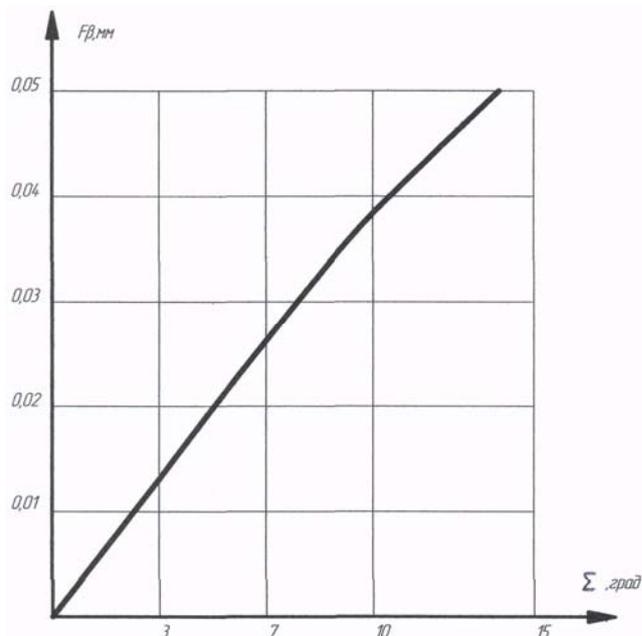


Рис. 3. Погрешность направления зуба в зависимости от изменения расчетного угла скрещивания осей.

На рис. 4 – рис. 6 представлены графики, характеризующие увеличение ширины впадины при комбинированном перекосе и изменении расчетного угла скрещивания ( $\Delta \Sigma = 10$  мин;  $\Delta \Sigma = 20$  мин;  $\Delta \Sigma = 40$  мин). Кроме того, точность обработки при шевинговании определяется радиусом основной окружности заготовки  $r_{b1}$ , торцовым углом зацепления в полюсе  $\alpha\omega t_0$ , торцевым углом давления у головки зуба  $\alpha\omega t_1$ . Переточки и износ шевера в значительной степени влияют на величину угла зацепления в полюсе, его величина может уменьшаться с  $22^\circ$  (для нового инструмента) до  $17^\circ$  после нескольких переточек [7]. Поэтому, с целью исключения появления необработанных участков у торцов зубьев в расчетных зависимостях для определения ширины венца инструмента необходимо учитывать минимальное значение величины  $\alpha_{at1}$  [8]. Для случая тангенциального шевингования расчетная зависимость имеет вид:

$$b_o = \frac{b_1}{\cos \Sigma} + d_{b1} \cos \alpha\omega t_n \cdot \sin \Sigma (tg \alpha_{at1} - tg \alpha\omega t_n), \quad (4)$$

где  $b_o$  - ширина зубчатого венца шевера, мм;  $\alpha\omega t_n$  - торцовый угол зацепления изношенного инструмента, град.

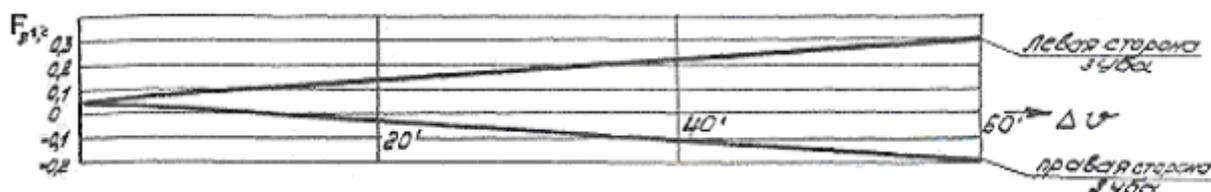


Рис.4. Увеличение ширины впадины при комбинированном перекосе и изменении расчетного угла скрещивания  $\Delta \Sigma = 10$  мин.

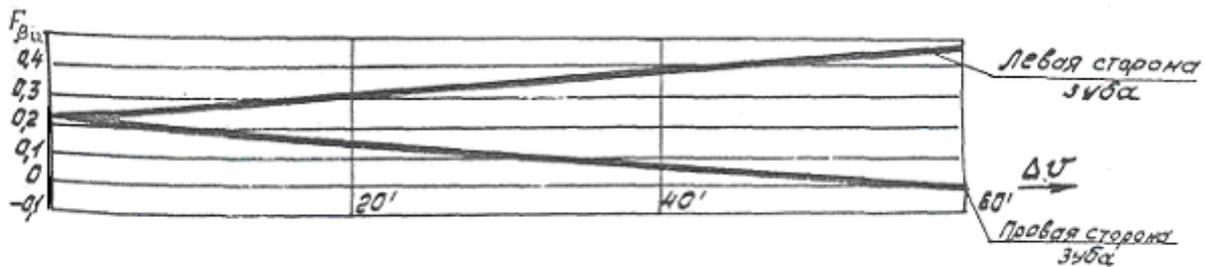


Рис. 5. Увеличение ширины впадины при комбинированном перекосе и изменении расчетного угла скрещивания  $\Delta \Sigma = 20$  мин.

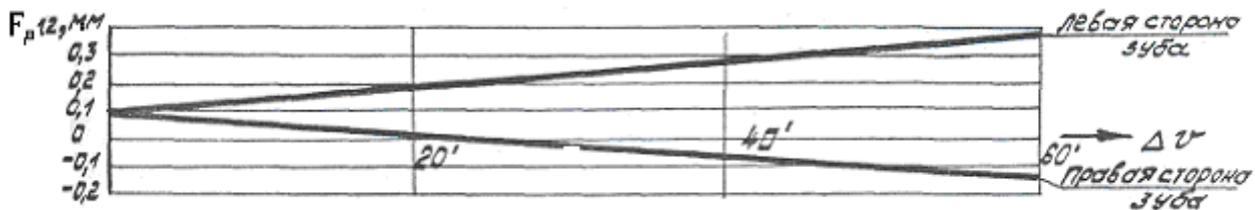


Рис. 6. Увеличение ширины впадины при комбинированном перекосе и изменении расчетного угла скрещивания  $\Delta \Sigma = 40$  мин.

Проведенные аналитические и экспериментальные исследования позволяют сделать вывод о том, что возникающие в начале и конце цикла обработки деформации технологической системы приводят к изменению угла скрещивания осей шевера и заготовки, и как следствие возникновению погрешности направления зуба. Изменение величины удаляемого припуска в процессе обработки приводит к смещению пятна контакта вдоль зуба заготовки. Наибольшая погрешность направления зуба соответствует заготовкам, имеющим наибольшее радиальное биение. Уменьшение погрешности направления зуба достигается при увеличении числа зубьев инструмента. Аналитические исследования станочного зацепления инструмента и заготовки при скрещивающихся осях позволили получить расчетные зависимости для определения параметров настройки технологической системы, учитывающие переточки инструмента в процессе обработки.

**Литература:** 1. Калашников С.Н., Калашников А.С. Изготовление зубчатых колес. – М.: Высшая школа, 1985. – 223 с. 2. Сухоруков Ю.Н. Влияние деформации систем на точность процесса шевингования зубчатых колес методом тангенциальной подачи. – Передовой научно-технический опыт, № 6-63-285/34. – М.; 1983. – С. 35-45. 3. Марков А.Л. Измерение зубчатых колес. (допуски, методы и средства контроля). – Л.: Машиностроение, 1968. – 308 с. 4. Люкшин В.С. Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов. – М.: Машиностроение, 1967. – 372 с. 5. Уминский С.М. Исследование влияния параметров станочного зацепления на точность отделки при шевинговании методом тангенциальной подачи. – Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. Труды 8-й Международной научно-технической конференции. – Харьков: ХНПК, 2003. – С. 56-61. 6. Соколов В.Н. Повышение эффективности шевингования зубчатых колес. – Сборник 1: Пути повышения точности обработки зубчатых колес. – М.: Машгиз, 1954. 7. Сухоруков Ю.Н., Евстигеев Р.И. Инструменты для обработки зубчатых колес методом свободного обката. – К.: Техника, 1983. – 120 с. 8. Разработать и исследовать перспективные операции технологического процесса обработки зубчатых колес редуктора гидромашин: Отчет по НИР/ Одесский политехнический институт. Руководитель Ю.Н. Сухоруков. -170-31; № ГР 1860033120. – Одесса; 1987. – 142 с.: ил.

## ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ УГЛА СКРЕЩИВАНИЯ ОСЕЙ СОПРЯЖЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗАГОТОВКИ И ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОТДЕЛКЕ МЕТОДАМИ СВОБОДНОГО ОБКАТА НА ТОЧНОСТЬ И КАЧЕСТВО ОБРАБОТКИ

Уминский С.М., канд. техн. наук (г. Одесса, Украина)

*The way of reception of longitudinal updating tools is described l sheaving without use special adaptations and has attached. The settlement dependences for definition of a corner of axes submission are given which provide achivement of longitudinal updapping tools.*

Зубчатая передача является одним из самых ответственных узлов любой машины, и зачастую определяет эксплуатационные показатели и надежность машины или устройства. Современные тенденции развития машин требуют постоянно совершенствования как конструкций передач, так и технологии их изготовления. Универсальность, значительная величина статических и динамических нагрузок, допускаемых в зубчатой передаче, определяют массовый характер ее применения. Эксплуатационные показатели зубчатых колес в значительной степени зависят от технологических способов их окончательной обработки. В настоящее время обработка зубчатых колес методами свободного обката является одним из наиболее эффективных методов отделки зубчатых колес [1].

Особенностью шевингования методом «короткого хода» является то, что подача 3 заготовки направлена перпендикулярно к оси шевера 2 (рис. 1) Одной из положительных сторон этого метода является возможность использования шевера с меньшей шириной зубчатого венца при обработке колес с большей шириной зубчатого венца в сравнении с тангенциальным методом [2].

Процесс шевингования сопровождается явлением поверхностно-пластического деформирования обрабатываемой поверхности, созданием определенной степени наклепа. Кроме того, при «короткого хода» и тангенциальном методах, качество обработки несколько уменьшается, вследствие отсутствия продольной подачи. Это приводит к образованию волнистости на обрабатываемой поверхности [3].

В процессе осуществления тангенциального и «короткого хода» методов шевингования возрастающие усилия резания приводят к упругим деформациям технологической системы, которые при врезании шевера увеличиваются, а при выходе уменьшаются. В период врезания шевера происходит увеличение величины удаляемого припуска и как следствие увеличивается пятно контакта инструмента и заготовки. Увеличение пятна контакта приводит к возрастанию усилий резания, которые в этот период достигают таких значений, при которых дальнейшего врезания режущих зубцов шевера в боковую поверхность обрабатываемой заготовки не происходит (рис. 2). В начале рабочего хода угол скрещивания осей шевера и заготовки  $\Sigma'$  отличается от расчетного угла скрещивания  $\Sigma$ .

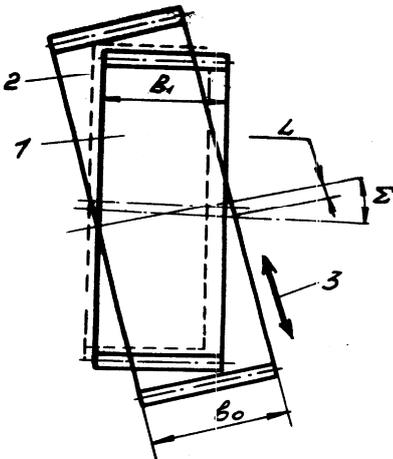


Рис.1. Схема шевингования методом «короткого хода».

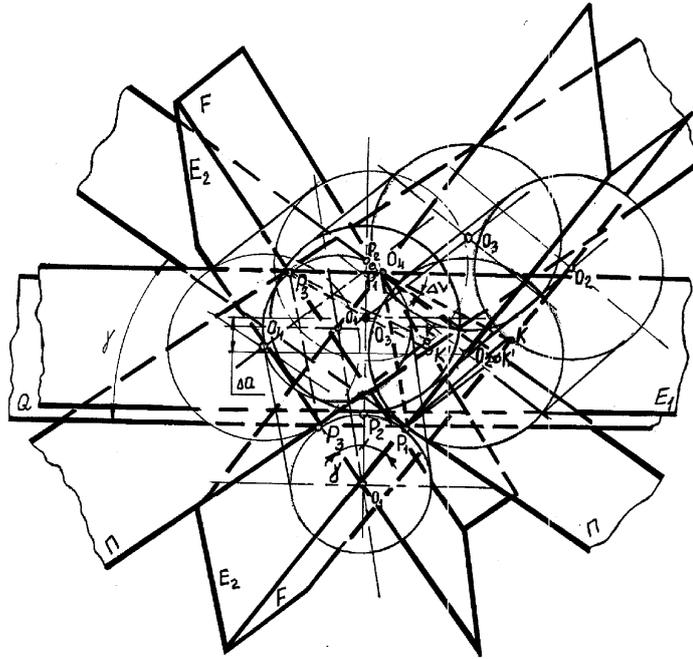


Рис. 2. Изменение межосевого расстояния при шевинговании методом «короткого хода».

Образующая делительного цилиндра шевера составляет с плоскостью проведенной через точки контакта делительных цилиндров шевера и заготовки в начале и конце цикла обработки и касательными к делительному цилиндру заготовки угол  $\Delta V$ . Поэтому в начале рабочего хода будет иметь место комбинированный перекося осей шевера и заготовки: перекося осей шевера и заготовки (угол  $\Delta \Sigma$ ), отклонение от параллельности осей (угол  $\Delta V$ ) [4].

Расчетные зависимости для определения этих величин имеют вид:

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

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

$$\Delta \Sigma = \Sigma' - \Sigma, \quad (3)$$

где  $r_1$  - радиус делительной окружности заготовки, мм;  $r_0$  - радиус делительной окружности шевера, мм;  $\Delta a$  - изменение положения центра скрещивания осей заготовки и инструмента, мм.

В процессе шевингования методом «короткого хода» наибольшего значения угол  $\Delta V$  достигает при врезании и выходе шевера, и стремится к нулю при максимальных деформациях технологической системы. В этих точках погрешность направления линии зуба является максимальной, т.к., в результате возникающего перекося осей шевера и заготовки происходит изменение площади пятна контакта

[5] и определяется зависимостью:

$$Fb_{1,2} = \frac{tg(\Sigma^3 - \Sigma)\sqrt{2gz}}{tg \ln(tg\beta_1 - tg\beta_0)} + 2b_1 tg \ln \sin \Sigma \sqrt{\frac{\Delta \alpha (2(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1) - \cos^2 \Sigma)}{(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1)(1 + tg^2 \Sigma)(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1 - \Delta \alpha \cos^2 \Sigma)}}, \quad (4)$$

где  $F_{\beta_{1,2}}$  - погрешность направления линии зуба, мм;  $\alpha_n$  - нормальный угол зацепления, град;  $b_1$  - ширина зубчатого венца заготовки, мм;  $\Delta \Sigma$  - величина угла перекося осей шевера и заготовки, град;  $Z$  - величина удаляемого припуска, мм;  $\beta_1$  - угол наклона линии зуба обрабатываемого колеса, град;  $\beta_0$  - угол наклона линии зуба инструмента, град;  $g$  - длина линии зацепления, мм.

Величина линии зацепления с достаточной точностью [6] может быть рассчитана по зависимости:

$$g = \frac{\sqrt{d_{w1}^2 - d_{b1}^2}}{2 \cos \alpha_n \sin \beta_1} + \frac{\sqrt{d_{w0}^2 - d_{b0}^2}}{2 \cos \alpha_n \sin \beta_0}. \quad (5)$$

В формуле (5) приняты обозначения:  $d_{w1}$  и  $d_{w0}$  - диаметры начальных цилиндров заготовки и инструмента, мм;  $d_{b1}$  и  $d_{b0}$  - диаметры основных цилиндров заготовки и инструмента, мм.

Экономическую эффективность процесса шевингования в значительной мере определяет стоимость используемого инструмента. Для тангенциального и «короткого хода» методов шевингования стоимость инструмента несколько выше, чем при других методах шевингования. Это обусловлено большей шириной зубчатого венца таких шеверов, сложностью их конструкции и заточки.

При выборе и проектировании шевера для обработки с подачей заготовки под углом к оси шевера необходимо учитывать, что центр скрещивания осей перемещается от одного торца к другому. В этом случае происходит изменение величины заборной части. Величина ширины шевера является важнейшим элементом его конструкции, и существенно влияет на производительность и качество обработки [7]. Наиболее резкое изменение заборной части происходит при тангенциальном и «короткого хода» методах шевингования.

Для обеспечения достаточного контакта между зубьями обрабатываемого колеса и шевера, а также для получения продольной модификации зубьев колеса, зубья шевера должны иметь вогнутость в продольном направлении. Режущие зубцы шевера должны быть смещены один относительно другого и расположены по винтовой линии, чтобы компенсировать отсутствие продольной подачи при снятии стружки. Величина смещения зубцов при переходе от зуба к зубу равна отношению шага между зубцами к числу зубьев шевера. Анализ традиционных зависимостей для определения ширины шевера для «короткого хода» метода шевингования показывает что они учитывают лишь калибрующую часть ширины инструмента, зависящую от ширины зубчатого венца заготовки и угла скрещивания осей заготовки и инструмента. Для учета величины профилирующей части шевера использовалась система отсчета не связанная с производящим контуром. Станочное зацепление шевера с заготовкой рассмотрено в двух проекциях - радиальной и торцевой. Рассмотрены геометрические параметры станочного зацепления, определяющие длину

и положение в пространстве линии зацепления, а также длину и расположение на ней активной ее части. Кроме того, в традиционных зависимостях не учитывается положение активной части линии зацепления по всей ее длине относительно полюса станочного зацепления и изменение этого положения по мере переточки и износа инструмента, что приводит к появлению необработанных участков у торца зубьев заготовки [8]. Переточки и износ инструмента в значительной степени влияют на величину торцового угла зацепления, в полюсе его величина уменьшается. Точность и качество обработки при шевинговании методом «короткого хода» будут определяться радиусом основной окружности заготовки  $r_{b1}$ , торцовым углом зацепления в полюсе  $\alpha_{wto}$ , торцовым углом давления у головки зуба  $\alpha_{at1}$ . Поэтому, для полной обработки зубьев по ширине в расчетных зависимостях для определения ширины венца инструмента необходимо учитывать минимальные значения величины  $\alpha_{wto}$ .

Расчет зависимости для определения ширины зубчатого венца шевера для обработки методом «короткого хода» имеет вид:

$$b_o = b_1 \cdot \cos \Sigma + db_1 \cos \alpha_{oin} \cdot \sin \Sigma (tg \alpha_{at1} - tg \alpha_{wth}), \quad (6)$$

где  $\alpha_{wth}$  - торцовый угол зацепления изношенного шевера, град;  $\Sigma$  - угол скрещивания осей заготовки и инструмента, град;  $b_1$  - ширина зубчатого венца заготовки, мм.

В большинстве традиционных расчетных зависимостей ширины профилирующей части компенсирована поправками на неточность установки и изготовления заготовки. Проведенные аналитические и экспериментальные исследования позволяют сделать вывод о том, что при шевинговании методом «короткого хода» возникающие в начале и конце цикла обработки деформации технологической системы приводят к изменению угла скрещивания осей шевера и заготовки, возникновению погрешности направления линии зуба. Изменение величины удаляемого припуска приводит к смещению пятна контакта вдоль зуба заготовки, изменению площади пятна контакта.

При определении параметров настройки технологической системы и расчетах ширины инструмента для шевингования методом «короткого хода» необходимо учитывать изменение геометрических параметров станочного зацепления, возникающих в результате износа инструмента. В этом случае достигается высокая производительность и точность отделки.

**Литература:** 1. Калашников С.Н., Калашников А.С. Изготовление зубчатых колес. – М.: Высшая школа, 1985. - 223с. 2. Сухоруков Ю.Н. Влияние деформации системы на точность процесса шевингования зубчатых колес методом тангенциальной подачи. – Передовой научно-технический опыт, № 6-63-285/34. – М., 1983. – С. 35-45. 3. Марков А.Л. Измерение зубчатых колес (допуски, методы и средства контроля). – Л.: Машиностроение, 1968. – 308 с. 4. Люкшин В.С. Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов. – М.: Машиностроение, 1967. – 372 с. 5. Уминский С.М. Дослідження зміни міжосьової відстані сполучених поверхонь інструмента й оброблюваного колеса при шевінгуванні. – Вісник інженерної академії України, №3, 2001, частина 2. – С. 552-555. 6. S. Uminski; E. Krasowski. Influence of change of a corner of crossing of axes of the connected surfaces at processing sheaving a method of “short course”. – Труды 5 юбилейной международной конференции MOTROL -2005. – Люблин – Одесса, том 7. – С. 185-190. 7. Сухоруков Ю.Н., Евстатиев Р.И. Инструменты для обработки зубчатых колес методом свободного обката. – К.: Техника, 1983. -123 с. 8. Сухоруков Ю.Н. Модификация эвольвентных цилиндрических зубчатых колес: Справочник. – К.: Техника, 1992. – 197 с.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД ПРИ ПРОТЯГИВАНИИ

Макаров В.Ф., докт. техн. наук, Чигодаев Н.Е., Токарев Д.И. (г. Пермь, Россия)

*Results of research of orthogonal cutting of details from scales aviation steels and alloys on various speeds of cutting are presented. It is proved, that optimum conditions of orthogonal cutting are defined proceeding from the optimum temperature of cutting corresponding to temperature of a failure of plasticity for the given material.*

Протягивание применяется на большинстве деталей газотурбинных двигателей (ГТД) как наиболее производительный, а часто, как единственно возможный процесс обработки. На основании выполненных исследований практически решена проблема оптимизации процесса протягивания путем использования разработанного метода скоростного протягивания, оптимизации его параметров и инструмента. Теоретически и практически доказано, что применительно к условиям прерывистой многолезвийной обработки протягиванием жаропрочных сталей и сплавов, имеющей ярко выраженную статистическую природу, существует такое термомеханическое состояние зоны резания каждого режущего элемента протяжки, характеризующее некоторой температурой резания, называемой оптимальной, при которой наблюдаются наиболее благоприятные условия формирования требуемых параметров качества обработанной поверхности и минимальные значения интенсивности износа инструмента. Разработаны обобщенные аналитические и экспериментальные математические модели расчета оптимальных режимов резания при протягивании гаммы труднообрабатываемых сталей и сплавов, применяемых в производстве газотурбинных двигателей [1].

В результате доказано и подтверждено многолетней практикой, что оптимальные скорости резания при протягивании должны находиться в диапазоне скоростей резания от 20 до 40 м/мин и более для различных групп труднообрабатываемых сталей и сплавов.

Проведена оценка влияния режимов резания и геометрии протяжек на основные параметры качества поверхностного слоя и усталостную прочность обработанных деталей и замковых соединений в целом. Доказано, что оптимизация процесса протягивания улучшает качество обработки и повышает усталостную прочность протянутых деталей

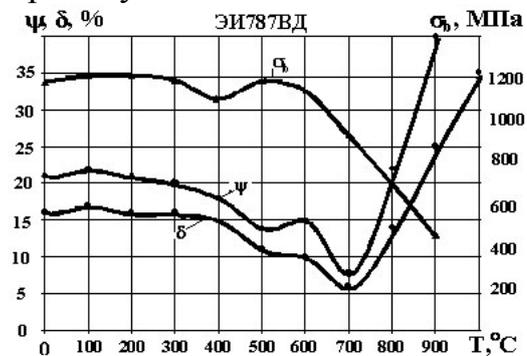


Рис.1. Влияние температуры механических испытаний T на прочностные  $\sigma_b$  и пластические ( $\delta, \psi$ ) свойства жаропрочного сплава ЭИ787ВД.

Экспериментальное исследование было проведено на специальной установке для скоростного протягивания на прямоугольных образцах с использованием специальных многозубых протяжек с различным числом зубьев. Контактная температура замерялась методами искусственной и естественной термопары, данные записывались на осциллограф. Износ по задней грани зубьев протяжек замерялся на микроскопе.

Анализ результатов исследования изменения пластичности  $\delta, \psi$  жаропрочного сплава ЭИ787ВД от температуры механических испытаний T (рис.1) и результатов исследования изменения интенсив-

ности износа протяжек  $h_{озл}$  и температуры резания  $T$  от скорости резания  $V$  и подачи на зуб  $Sz$  (рис.2) показал, что установленное ранее совпадение температуры провала пластичности  $T_{пл}$  с оптимальной температурой резания  $T_o$  для ряда материалов при различных видах лезвийной обработки [2] подтвердилось и при протягивании жаропрочных сталей, титановых сплавов и жаропрочных сплавов на никелевой и железоникелевой основах [1]. Это позволяет объяснить экстремальный характер зависимости износа зубьев от скорости резания  $h_{озл}=f(V)$  при протягивании с физической точки зрения соответствующим изменением пластических свойств обрабатываемых материалов при повышении температуры резания.

Установлено, что у каждого обрабатываемого материала минимум на кривых интенсивности износа зубьев протяжки  $h_{озл}=f(V)$  для разных значений подъема на зуб  $Sz$  наблюдается при различных оптимальных скоростях резания, которым соответствует одна и та же оптимальная температура контакта (рис.2). При протягивании жаропрочного сплава ЭИ787ВД с подачами 0,02; 0,06; 0,1 мм/зуб минимумы интенсивности износа протяжек  $h_{озл}$  имеют место при скоростях соответственно 30; 22; 15 м/мин при одной и той же оптимальной температуре резания  $T_o=700^\circ\text{C}$ . При протягивании сплава ЭИ437БУВ на этих подачах, оптимальным скоростям резания 35; 28; 25 м/мин соответствует  $T_o=720^\circ\text{C}$ . При протягивании сплава ЭП109ВД на этих подачах, оптимальным скоростям резания 20; 15; 12 м/мин соответствует  $T_o=820^\circ\text{C}$ .

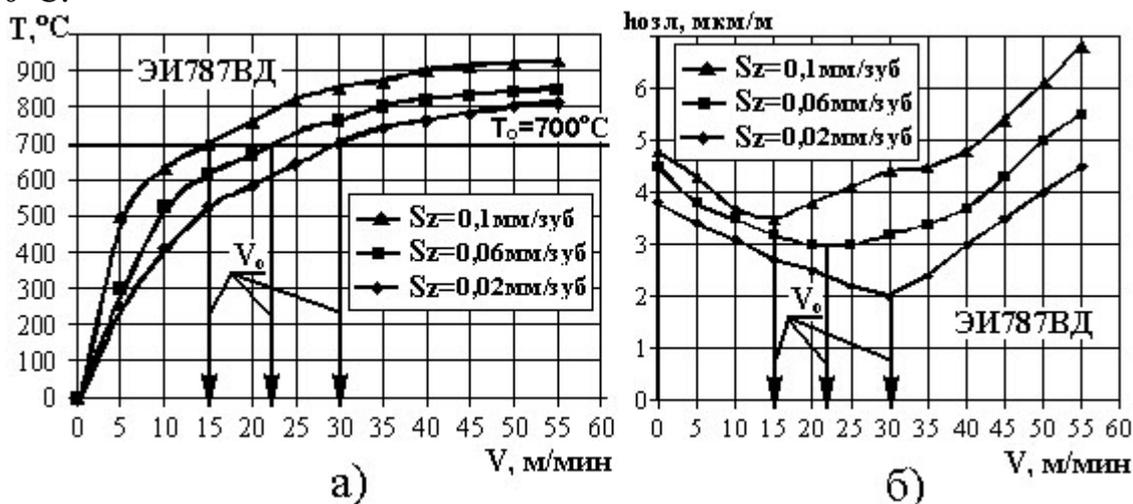


Рис.2. Влияние скорости резания  $V$  на изменение температуры резания  $T$  (а) и интенсивность износа протяжек  $h_{озл}$  (б) при протягивании жаропрочного сплава ЭИ787ВД с различными подачами на зуб  $Sz$ .

Применение скоростного протягивания способствует повышению усталостной прочности замковых соединений деталей ГТД по сравнению с низкоскоростной обработкой. При протягивании пазов в кольцах НА из стали ЭИ962 и титанового сплава ОТ-4 усталостная прочность повышается на 8-10%, а при протягивании пазов "ласточкин хвост" в дисках компрессоров из титановых сплавов ВТ3-1 и ВТ18У увеличение усталостной прочности составляет более 60% по сравнению низкоскоростной обработкой. При протягивании жаропрочных деформируемых и литейных сплавов повышение усталостной прочности с увеличением скорости резания происходит в меньшей степени [1].

Проведение процесса протягивания на более интенсивных режимах резания

при температурах контакта, соответствующих температурам провала пластичности, позволяет существенно снизить интенсивность износа протяжек, уменьшить силы резания и деформацию поверхностного слоя, улучшить процесс стружкообразования и тем самым способствовать получению более высоких и стабильных параметров качества поверхностного слоя, повышению усталостной прочности, надежности и ресурса деталей ГТД [1].

Важно отметить, что при протягивании многосекционным блоком протяжек, по мере продвижения блока и соответствующего перехода от черновых секций к чистовым, с уменьшением величины подачи на зуб  $S_z$  скорость протягивания необходимо увеличивать до оптимальных величин, а не уменьшать, как это рекомендовалось ранее. В результате производительность протягивания и стойкость протяжек повышается в несколько раз. Такое технологическое управление осуществимо на скоростных горизонтально-протяжных станках с ЧПУ марки «Hoffmann».

**Литература:** 1. Макаров В.Ф. Интенсификация процесса протягивания труднообрабатываемых материалов. – Дисс. ... докт. техн. наук. – Перм. гос. техн. ун-т.– Пермь, 1998. 2. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976.

**УДК 621.992.4**

## **КОМПЬЮТЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕЗЬБОШЛИФОВАНИЯ**

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

*Thread grinding technological system 3D-geometric model is given.*

Требования к точности прецизионных резьб ходовых винтов передач качения возрастают по мере совершенствования технологии их изготовления. Технологическая система резьбошлифования (ТС) включает три основных элемента, расположенных в пространстве в определенной взаимосвязи: заготовка, шлифовальный круг, правящий ролик. Известно, что ТС — это временная конструкция, которую собирает технолог для механической обработки отдельных поверхностей заготовки. В производственных условиях расположение этих элементов и их геометрические параметры определяют методом пробных проходов и промеров, что является достаточно трудоёмкой процедурой, особенно при правке точечными правящими инструментами (алмазными резцами, шарошкой и т.п.). В этой связи вопросы определения погрешностей взаимного расположения указанных элементов в пространстве и их влияние на форму и геометрические параметры окончательно сформированной резьбы относятся к числу актуальных в технологии машиностроения.

Задачи подобного типа до сих пор решались на основе одно- и двухмерного моделирования указанных элементов технологической системы при использовании определенных допущений. Например, расчет площади пятна контакта производили только на основе двухмерной геометрической модели сечения срезаемого слоя материала при допущении, что наклон круга на угол подъема резьбы не влияет на площадь пятна контакта. Ошибки в определении площади пятна контакта приводят, например, к погрешностям определения температуры шлифования, которые в свою очередь не позволяют оптимизировать цикл съема припуска (закрывающийся в определении оптимальных режимов шлифования). Как следствие, найденные таким образом режимы шлифования не обеспечивали наивысшую производительность обработки.

Современный уровень развития средств и программного обеспечения вычислительной техники позволяет осуществлять трехмерное геометрическое моделирование элементов технологической системы резбошлифования, находящихся в определенной взаимосвязи. Исследование виртуальной трёхмерной геометрической модели позволяет выполнить прецизионный анализ влияния погрешностей настройки ТС на параметры точности профиля канавки резьбы, а также установить влияние погрешности настройки шлифовального круга на угол подъема резьбы на площадь пятна контакта и температуру шлифования.

Имеются несколько программных продуктов, позволяющих осуществить пространственное геометрическое моделирование: Solid Works, MasterCAM, ProEngineer, AutoDeskInventor и др. Ниже рассмотрено построение геометрической модели ТС при помощи программы конструкторского проектирования AutoDeskInventor. Сущность методики построения геометрической модели ТС заключается в пошаговом выполнении процедур задания элементов ТС: заготовки, шлифовального круга и правящего ролика (рис.1, рис.2). Например, для задания виртуальной модели заготовки в формате 2D необходимо определить прямоугольник и одну из его длинных сторон принять за ось вращения. После вращения указанного прямоугольника в формате 3D получаем твердотельную геометрическую модель заготовки (рис.1, рис.2), которую можно рассматривать под разными углами. Выгодным преимуществом пакета AutoDeskInventor является возможность сохранения промежуточных кадров полученной модели в формате PDF, который может быть без потери качества графики перенесен в MS Word, как обычный рисунок. Обеспечение и контроль при моделировании пошаговых проектных процедур является необходимым условием адекватности трёхмерной геометрической модели.



Рис.1. Схема построения 3-мерной геометрической модели ТС.



Рис.2. Технологическая система резбошлифования: вид спереди.

На рис. 1 и рис. 2 приняты следующие геометрические параметры: диаметр шлифовального круга  $D_{шк} = 400$  мм, диаметр заготовки  $d_3 = 98$  мм, шаг нарезаемой резьбы  $P = 10$  мм, угол подъема винтовой линии  $\varphi = \arctg \frac{P}{\pi d_3} = 1,86^\circ$ , диаметр правящего ролика 40 мм. Обычное конструктивное расположение правящего ролика – сверху или сзади шлифовального круга, поэтому на рис. 1 показаны оба эти случая.

На данном этапе исследований разработанная компьютерная модель ТС используется для определения формы, размеров и площади пятна контакта (рис. 3).

Однако перед получением рис. 3 необходимо выполнить ряд проектных процедур. Например, на рис.4 показана одна из них: шлифовальный круг представлен из участков – верхнего (касательного к цилиндрической поверхности заготовки) и нижнего (максимально углублённого в тело заготовки на глубину шлифования). Между этими двумя участками расположен промежуточный участок шлифовального круга (не показан), который вырезает (выдавливает) часть объёма заготовки, образуя общую поверхность – пятно контакта.

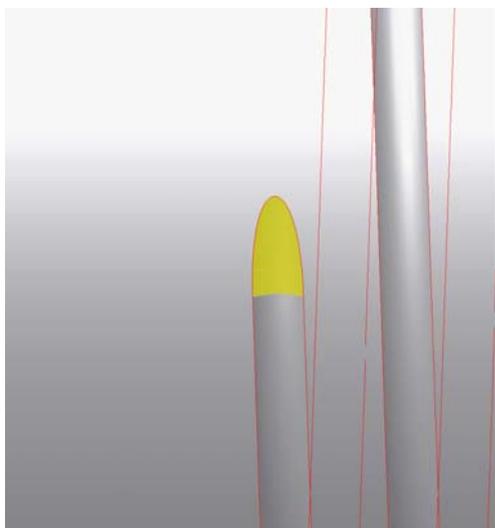


Рис.3. Пятно контакта шлифовального круга с заготовкой на первом переходе.

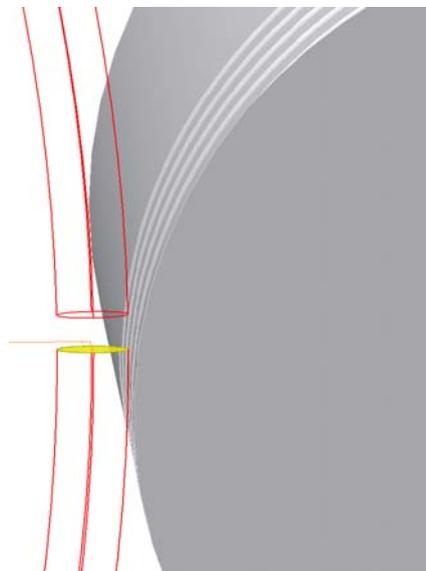


Рис.4. Промежуточная схема для построения области пятна контакта.

#### УДК 621.992.4

### СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ШЛИФОВАНИЯ

**Ларшин В.П.**, докт. техн. наук, **Лищенко Н.В.** (г. Одесса, Украина)

*A method to define of defect arise point, critical grinding temperature, and heat coefficient which can be used in computer diagnostic system development is given*

Одним из основных узлов в металлорежущих станках с ЧПУ является шарико-винтовая передача. Эта передача должна иметь высокую кинематическую точность, малый момент трения, высокий КПД, не иметь зазоров и обеспечивать необходимую точность позиционирования и плавность хода.

Качество и точность резьбовой поверхности ходовых винтов формируются на финишных операциях технологического процесса, где чаще всего используется шлифование. Однако в связи с наличием высоких температур в зоне контакта круга с изделием, которые зависят от большого количества изменяемых факторов, процесс шлифования является нестабильным. Кратковременное нагревание тонких поверхностных слоев при шлифовании сопровождается структурными превращениями в стали. От состояния поверхностного слоя зависят эксплуатационные свойства детали: износостойкость, долговечность, коррозионная стойкость и т.д. Значение критической температуры, при которой происходят структурно-фазовые превращения в стали, не известно, кроме того, она не является постоянной, так как зависит от режимов и условий шлифования, в частности – от скорости изменения температуры в зоне резания. Поэтому проведение исследований, связанных с определением крити-

ческой температуры является актуальной проблемой. В этой связи разработан способ определения критической температуры, который при шлифовании резьбы ходовых винтов с полукруглым профилем резьбы, реализуется следующим образом.

При обработке заготовки ходового винта диаметром  $d = 24$  мм шлифовальным кругом диаметром  $D = 375$  мм и радиусом профиля  $R = 2,75$  мм шлифуют канавку глубиной  $t = 0,2$  мм, затем устанавливают глубину резания  $t = 1,2$  мм, круговую подачу  $n = 0,5$  об/мин, далее дискретно увеличивают круговую подачу до  $n = 2$  об/мин при фиксированной глубине резания  $t = 1,2$  мм до гарантированного появления дефектного слоя – прижога. Потом устанавливают промежуточное значение круговой подачи  $n = 1,25$  об/мин, которая равняется среднему арифметическому значению минимального ( $n = 0,5$  об/мин) и максимального ( $n = 2$  об/мин) значений круговой подачи. Обзор поверхности контакта позволяет подтвердить наличие прижога, но уже меньшего, чем при  $n = 2$  об/мин. Потом устанавливают новое промежуточное значение круговой подачи  $n = 0,875$  об/мин, которое равняется среднему арифметическому значению минимального ( $n = 0,5$  об/мин) и предыдущего максимального ( $n = 1,25$  об/мин) значений круговой подачи.

Контроль прижога производят путем визуального осмотра поверхности контакта между кругом и заготовкой. Эта поверхность находится в переходной зоне между обработанным и необработанным участками заготовки. Для визуального контроля этой зоны рукояткой быстрого отвода шлифовального круга последний отводят от заготовки, прекращая процесс обработки.

Таким образом, значение круговой подачи  $n = 0,875$  об/мин и глубина шлифования  $t = 1,2$  мм являются режимами резьбошлифования, при которых образуется шлифовочный прижог. Если в этой точке дополнительно измерить мощность резания, то появляется возможность определения двух параметров: критической температуры и коэффициента тепловода.

В качестве исходных данных приняты: коэффициенты тепло- и температуропроводности  $a = 8,4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\lambda = 42$  Вт/м·с; глубина предварительно сформированной канавки  $t_1 = 0,2$  мм; мощность шлифования  $P = 200$  Вт. В этой точке площадь пятна контакта  $S$  составляет

$$S = \sqrt{\frac{D \cdot d \cdot t_0}{D + d}} \cdot R \left[ \arccos\left(\frac{R - t_1}{R}\right) + \arccos\left(\frac{R - (t_1 + t_0)}{R}\right) \right] = 2,05 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

Плотность теплового потока  $q$  составит:

$$q = \frac{P}{S} = \frac{200}{2,05 \cdot 10^{-5}} = 9,7 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2.$$

Время действия теплового источника

$$\tau = \frac{\sqrt{\frac{D \cdot d \cdot t_0}{D + d}}}{v} = 4,752 \text{ с.}$$

Температура шлифования (критическая)

$$T_{кр} = \frac{2 \cdot q \cdot \sqrt{a \tau} \cdot m}{\lambda \cdot \sqrt{\pi}} = 882,03 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Таким образом, найденная критическая температура (882 °С) отличается от общепринятого значения критической температуры 550 °С, которую определяют как точку высокотемпературного отпуска по статической диаграмме «железо-углерод».

Таким образом, найденная критическая температура (882 °С) отличается от общепринятого значения критической температуры 550 °С, которую определяют как точку высокотемпературного отпуска по статической диаграмме «железо-углерод».

Известно, что коэффициент тепловвода определяется как [1]

$$\psi = \frac{\varepsilon_{y0}}{A_{y0}},$$

где  $A_{y0} = \frac{P}{Q}$  — удельная работа шлифования;  $Q$  — объем металла, который удаляется в единицу времени.

Здесь [2]

$$Q_{ij} = \omega \left[ R_k \left( a \sqrt{R^2 - a^2} + R^2 \arcsin \frac{a}{R} \right) + \frac{a^3}{3} + (R_e^2 - R_k^2 - R^2) a \right],$$

$\omega$  — угловая скорость вращения изделия,  $\omega = \frac{\pi n}{30}$ ;  $R_k = R_e + R - \sum_{j=1}^k t_{ij}$ ;  $R_e$  — радиус винта;  $R$  — радиус профиля шлифовального круга;  $a$  — ширина области интегрирования  $a = R \sin(\arccos(\frac{R - t_{ij}}{R}))$ .

Таким образом, в точке образования прижога:  $Q = 4,299 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $A_{y0} = 4,65 \cdot 10^{10} \text{ Дж}/\text{м}^3$ ;  $\varepsilon_{y0} = 2,505 \cdot 10^{10} \text{ Дж}/\text{м}^3$ . Следовательно,  $\psi = 0,538$ .

Важность полученных результатов вытекает из того факта, что величина  $T_{кр}$  не является постоянной, она зависит от скорости тепловых процессов при шлифовании (из работ Евсеева Д.Г. известно, что с увеличением скорости изменения температурного поля величина  $T_{кр}$  увеличивается).

**Литература:** 1. Ларшин В.П. Технология многониточного шлифования прецизионных ходовых винтов // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 1999, вып. 2 (8). — С. 87-91. 2. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов, А.Н. Паршаков, В.И. Свирщев, В.П. Ларшин. — К.: Техника, 1983. — 184 с.

**УДК 621.992.4**

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ШАГА РЕЗЬБЫ ХОДОВЫХ ВИНТОВ ПРИ РЕЗЬБОШЛИФОВАНИИ

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

*A mathematical model of the pitch temperature error for the lead screw thread is developed and investigated at thread grinding*

Точность шага резьбы ходовых винтов передач винт-гайка качения и скольжения формируется при финишном резьбошлифовании. Многочисленные исследования показывают, что точность резьбошлифовального станка является необходимым, но не достаточным условием обеспечения точности шага обрабатываемой резьбы — важнейшего показателя качества передачи. Существенное влияние на точность шага резьбы оказывают режимы и условия резьбошлифования, а также исходная погрешность резьбы. Стабилизация шаговой погрешности резьбы на предварительных операциях резьбошлифования, в том числе при обработке резьбы многониточными кругами [1], позволила уменьшить влияние технологической наследственности шаговой погрешности резьбы между черновой и финишными операциями. Однако не-

стабильность погрешности на финишной операции сохранилась [2]. Как показали исследования, проведенные нами на ряде заводов Украины и России, причиной этого является колебание температуры заготовок ходовых винтов при финишном резьбошлифовании, вызванные изменением условий и режимов обработки. Колебания температуры приводят к колебаниям температурных деформаций заготовок, что при многопроходном финишном резьбошлифовании обуславливает значительный разброс шаговой погрешности резьбы даже на высокоточных резьбошлифовальных станках, например, типа “Matrix 5708” (Великобритания) или “Lindner” (ФРГ), которые оснащены системами автоматической стабилизации температуры СОЖ. В станках “Lindner”, кроме того, стабилизирована температура ходового винта продольной подачи. Для уменьшения нестабильности шага резьбы эти станки часто устанавливают в специальных термоконстантных помещениях.

Для выявления механизма образования погрешности шага резьбы необходимо разработать математическую модель температурного поля, возникающего в заготовке при финишном резьбошлифовании. Выбору расчётной схемы, параметров и закона движения теплового источника (генерирующее тепловое поле в заготовке) предшествовал анализ работ [3-5]. В работе [3] получено решение для полосового источника теплоты, движущегося по винтовой линии. Однако решение в общем виде не было исследовано (кроме частных случаев) и полученная для описания температурного поля функция не может быть непосредственно просчитана на ПЭВМ без проведения трудоёмких исследований по построению алгоритмов численного расчёта. В работе [4] полученное решение не доведено до вида, необходимого при расчёте средних температур, а наши попытки это сделать позволили установить, что решение, приведенное в данной работе, оказывается не чувствительным к времени действия (нагрева) теплового источника. Например, изменение времени действия теплового источника на порядок приводит к изменению средней температуры всего лишь на 10-15 %, что противоречит экспериментально наблюдаемым фактам. В работе [5] содержатся упрощённая постановка и решение задачи по определению температурного поля в заготовке. Автор этой работы исследует температурное поле, зависящее только от времени и описываемое обыкновенным дифференциальным уравнением теплопроводности (в отличие от уравнения в частных производных, как в работах [3] и [4]). Это приводит к существенной погрешности в определении температурного поля.

Разработаны схемы реального и принятого тепловых источников. В первом случае по винтовой линии со скоростью  $V_0$  движется полосовой источник теплоты, имеющий плотность теплового потока  $q_p$  и длину  $L_p$ . Во втором – в осевом направлении заготовки со скоростью  $V_0$  движется кольцевой источник тепла со следующими параметрами:  $q_k$ ,  $l_k$ . Выбор схемы кольцевого источника теплоты обусловлен следующими соображениями:

1) результатом расчёта является не мгновенная, а усреднённая по сечению заготовки температура, которая определяет температурную деформацию заготовки;

2) сечение, в котором определяется средняя температура, удалено от источников (реального-полосового и принятого-кольцевого) на значительное расстояние, равное длине зоны охлаждения (60-100 мм) и, поэтому, в соответствии с известным “принципом местного влияния” акад. Рыкалина Н.Н. [6] схема теплового источника

(при одинаковой его суммарной мощности) незначительно влияет на температурное поле;

3) температурное поле от кольцевого источника симметричное (относительно оси заготовки) и поэтому значительно проще в описании, чем температурное поле от реального полосового источника, движущегося по винтовой линии. Это позволяет проводить вычислительные эксперименты на ПЭВМ без применения специальных математических программ.

Температурное поле в цилиндре от движущегося по его поверхности кольцевого источника в условиях охлаждения СОЖ описывается функцией [7]

$$T(r, F_{02}^k) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(\mu_n \cdot \frac{r}{R}\right)}{J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)} \cdot \frac{2}{R^2} \cdot \int_0^r r [f(r) - T_c] \times \\ \times J_0\left(\mu_n \cdot \frac{r}{R}\right) dr \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot F_{02}^k) + T_c, \quad (1)$$

где  $r, R$  – текущий и максимальный радиусы заготовки,  $0 \leq r \leq R$ ;  $J_0, J_1$  – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка;  $\mu_n$  – корни характеристического уравнения  $J_0(\mu_n) \cdot B_i - J_1(\mu_n) \cdot \mu_n = 0$ ;  $B_i$  – критерий БИО,  $B_i = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot R$ ;  $F_{02}^k$  – критерий Фурье,  $F_{02}^k = \frac{a \cdot \tau_{02}^k}{R^2}$ ;  $\alpha, \lambda, a$  – коэффициенты теплообмена, тепло- и температуропроводности;  $\tau_{02}^k$  – время охлаждения;  $T_c$  – температура СОЖ;  $f(r)$  – начальное распределение температуры в цилиндре к моменту времени начала охлаждения.

Функцию  $f(r)$  находим как результат действия кольцевого источника в течение времени нагрева  $F_{01}^k = \frac{a \cdot \tau_{01}^k}{R^2}$ . По данным работы [7]

$$f(r) = \frac{q_k \cdot R}{\lambda} \cdot \left[ 2 \cdot F_{01}^k - \frac{1}{4} \left( 1 - 2 \cdot \frac{r^2}{R^2} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\beta_n^2 \cdot J_0(\beta_n)} \cdot J_0\left(\beta_n \cdot \frac{r}{R}\right) \cdot \exp(-\beta_n \cdot F_{01}^k) \right] + T_B, \quad (2)$$

где  $q_k$  – плотность теплового потока кольцевого источника теплоты;  $T_B$  – температура заготовки перед шлифованием;  $\beta_n$  – корни характеристического уравнения  $J_1(\beta_n) = 0$ .

Подставив уравнение (2) в уравнение (1) и сделав необходимые преобразования, получим функцию, описывающую мгновенное температурное поле от кольцевого источника тепла

$$T(\rho, F_{01}^k, F_{02}^k, B_i) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\mu_n \rho) \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot F_{02}^k) \cdot B_i}{J_0(\mu_n) [\mu_n^2 + B_i^2]} \times \\ \left\{ \frac{2q_k R}{\lambda} \left[ 2 \cdot F_{01}^k + \frac{1}{4} - \frac{2}{\mu_n^2} + \frac{1}{B_i} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot \exp(-\beta_n^2 \cdot F_{01}^k) \cdot \mu_n^2}{\beta_n^2 (\mu_n^2 - \beta_n^2)} \right] + 2(T_B - T_c) \right\}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – безразмерная цилиндрическая координата,  $\rho = \frac{r}{R}$ .

В уравнении (3) внутренняя сумма берется по корням  $\beta_n$ , а внешняя – по корням  $\mu_n$ .

Исследовано распределение температурного поля от кольцевого источника теплоты, полученного по уравнению (3) для различных условий охлаждения при различных сочетаниях параметров  $q_k$  и  $F_{01}^k$ , но при  $q_k \cdot F_{01}^k = const$  и  $T_B = T_c$ . Установлено,

что уменьшение времени нагревания ( $F_{01}^k$ ) в условиях охлаждения водной СОЖ приводит к уменьшению максимальных значений температуры, а при использовании в качестве СОЖ масла И-20 – к увеличению. Причем, влияние времени нагревания ( $F_{01}^k$ ) при  $q_k \cdot F_{01}^k = const$  особенно проявляется при малых значениях времени охлаждения  $F_{02}^k$  ( $F_{02}^k \leq 0,01$ ).

Для определения температурных деформаций заготовки необходимо найти среднюю температуру в сечении заготовки, которое выходит из зоны охлаждения (граница зоны охлаждения), т.е. в качестве  $F_{02}^k$  взять значение  $F_{02}^k = \frac{a \cdot l_{охл}}{R^2 \cdot V_0}$ , где  $l_{охл}$  – длина зоны охлаждения. Далее следует перейти к функции

$$\bar{T}(F_{01}^k, F_{02}^k, B_i) = \frac{2}{R^2} \cdot \int_0^R r \cdot T(\rho, F_{01}^k, F_{02}^k, B_i) dr. \quad (4)$$

В результате получаем

$$\bar{T}(F_{01}^k, F_{02}^k, B_i) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot F_{02}^k) \cdot B_i^2}{[\mu_n^2 + B_i^2] \cdot \mu_n^2} \cdot \left\{ \frac{q_k R}{\lambda} \left[ 2 \cdot F_{01}^k + \frac{1}{4} - \frac{2}{\mu_n^2} + \frac{1}{B_i} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot \exp(-\beta_n \cdot F_{01}^k) \cdot \mu_n^2}{(\mu_n^2 - \beta_n^2) \beta_n^2} \right] + (T_B - T_c) \right\}. \quad (5)$$

Исследовано влияние времени нагревания  $F_{01}^k$  на величину  $\bar{T}(F_{01}^k, F_{02}^k, B_i)$  при различных условиях охлаждения. Установлено, что условия охлаждения очень сильно влияют на среднюю температуру заготовки, в то время как влияние на неё времени нагревания  $F_{01}^k$  (при  $q_k \cdot F_{01}^k = const$ ) в интервале  $F_{01}^k > 0,5 \cdot 10^{-4}$  незначительное. Формула (5) позволяет перейти к температурной деформации  $\Delta l$  на основании известной связи между температурой стержня и его осевой деформации, т.е.

$$\Delta l = \gamma \cdot l_p \cdot \bar{T}(F_{01}^k, F_{02}^k, B_i), \quad (6)$$

где  $\gamma$  – коэффициент линейного расширения материала заготовки (для стали 8ХФ  $\gamma = 10^{-5}$  м/°с);  $l_p$  – длина шлифованной резьбой части заготовки (рис.1).

Однако, для использования формулы (6) необходимо определить параметры принятого кольцевого источника  $q_k$  и  $l_k$ . Для этого сформулированы два условия эквивалентности кольцевого (расчётного) и полосового (реального) тепловых источников: 1) равенство мощностей обоих источников; 2) равенство отводимых во внешнюю среду количеств тепловой энергии, приведенных к сечению, в котором находится средняя температура.

В соответствии с этими условиями составлена и решена система двух уравнений при следующих поверхностных температурах кольцевого и реального источников, соответственно

$$T_{ноб}^k = \frac{q_k \cdot R}{\lambda} \left[ 2 \sqrt{\frac{F_{01}^k}{\pi}} + \frac{1}{2} \cdot F_{01}^k + T_B \right], \quad T_{ноб}^p = \frac{2 \cdot q_p \cdot R}{\lambda} \sqrt{\frac{F_{01}^p}{\pi}} + T_B. \quad (7,8)$$

Получено

$$q_k = \frac{q_p \cdot L}{2H_0} \quad \text{и} \quad F_{01}^k = F_{01}^p = \frac{L_p \cdot a}{V_{\square} \cdot R^2}, \quad (9,10)$$

где  $H_0$  – полушаг обрабатываемой резьбы.

Таким образом,  $q_k$  меньше, чем  $q_p$  в  $L/2H_0$  раз, а  $F_{01}^k = F_{01}^p$ . Последнее обуслов-

лено тем, что кольцевой источник по сравнению с реальным источником имеет одновременно меньшую длину и меньшую скорость перемещения. В результате время воздействия обоих источников оказывается одинаковым.

Зная параметры кольцевого источника по формулам (5) и (6), для случая  $T_B = T_c$ , получим математическую модель для определения температурной погрешности шага резьбы заготовки при многопроходном одностороннем резьбошлифовании

$$\Delta l = \frac{P\psi R\gamma l_p}{2H_0\sqrt{dt}\lambda} \cdot \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot F_{02}) \cdot B_i^2}{[\mu_n^2 + B_i^2] \mu_n^2} \times \left( 2 \cdot F_{01} + \frac{1}{4} - \frac{2}{\mu_n^2} + \frac{1}{B_i} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot \exp(-\beta_n^2 \cdot F_{01}) \cdot \mu_n^2}{(\mu_n^2 - \beta_n^2) \beta_n^2} \right) \right], \quad (11)$$

где  $P$  – мощность резьбошлифования, Вт.

В формуле (11) обозначено

$$F_{01} = \frac{a}{R^2} \cdot \left[ \frac{\sqrt{dt}}{V_\delta} \right]; \quad F_{02} = \frac{a\pi l_{охл}}{RH_0 V_\delta}; \quad d = 2R.$$

Математическую зависимость (11) экспериментально проверяли при резьбошлифовании трёх заготовок ( $d = 61,4$  мм,  $R = 30,7$  мм,  $H_0 = 5$  мм) из стали 8ХФ ( $\lambda = 40$  Вт/(м °С),  $a = 8 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $\gamma = 10^{-5}$  м/°С). СОЖ – масло И-20 ( $B_i = 0,7$ ). В таблице приведены результаты и условия экспериментов.

Таблица

$\Delta l_{экс}$ , мкм	$\Delta l_{теор}$ , мкм	$\delta$ , %	Примечание
49	55	12,3	<b>Винт № 1</b> Станок МВ164, 4-ниточный круг 92А16М27К5, Р=2850 Вт, $t = 1,25$ мм, $V_\delta = 0,0253$ м/с, $l_p = 1000$ мм, $l_{охл} = 60$ мм, $\psi = 0,1$ .
16	17,5	9,4	<b>Винт № 2</b> Станок 5822М, 1-ниточный круг 24А25СМ18К5, Р=480 Вт, $t = 0,27$ мм, $V_\delta = 0,022$ м/с, $l_p = 300$ мм, $l_{охл} = 80$ мм, $\psi = 0,4$ .
28	22,6	19,3	<b>Винт № 3</b> Станок 5822М, 1-ниточный круг 24А25СМ18К5, Р=620 Вт, $t = 0,22$ мм, $V_\delta = 0,022$ м/с, $l_p = 300$ мм, $l_{охл} = 80$ мм, $\psi = 0,4$ .

Видно, что относительная погрешность  $\delta$  прогнозирования величины  $\Delta l$  по зависимости (11) не превышает 20%. Это позволяет использовать зависимость (11) для разработки управляющей программы микропроцессорной системы автоматического управления точностью финишного резьбошлифования, обеспечивающего наибольшую точность и производительность обработки.

**Литература:** 1. Соколов В.Ф., Ковальчук Е.Н., Ларшин В.П. Стабилизация тепловых деформаций ходовых винтов при многониточном шлифовании резьбы / Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты в технологии машиностроения. — Барнаул: Изд. Алтайского политехн. ин-та, 1984. — с. 42-46. 2. Ларшин В.П., Якимов А.В. Повышение стойкости многониточных резьбошлифовальных кругов / Резание и инструмент. — Харьков: Вища школа, 1985. — с. 109-112. 3. Бирюков П.К., Напарьин Ю.А. Температурное поле в бесконечном цилиндре от источника, движущегося по винтовой линии при граничном условии третьего рода / Сб. научн. трудов ППИ № 110. — Пермь: Изд. Пермск. политехн. ин-та, 1972. — с. 11-15. 4. Напарьин Ю.А., Паршаков А.Н., Шахурдин В.И. К задаче о температурном поле в цилиндре от кольцевых подвижных источников / Сб. научн. трудов ППИ № 138. — Пермь: Изд. Пермск. политехн. ин-та, 1973. — с. 19-23. 5. Бо-

голюбов Ю.В. Влияние тепловых деформаций детали при резьбошлифовании на погрешность шага резьбы / Металлорежущие станки и автоматические линии. — М.: НИИМАШ, 1980.— № 2. — с. 9-12. 6. Рыкалин Н.Н. Тепловые основы сварки. Часть 1. Процессы распространения тепла при дуговой сварке.- М.: Изд. Академии наук СССР, 1947. — 271 с. 7. Лыков А.В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. — 600 с.

**УДК 681.518.3.08**

## **ОЦЕНКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ АВТОМОБИЛЕЙ**

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

*The measuring data estimation technique for automobile computer diagnostic systems is resulte.*

В работе [1] были исследованы (в сравнительной форме) две методики оценки измерительной информации (данных) в системе компьютерной диагностики объектов (конструкций и процессов). Установлено различие в получаемых результатах оценки одного и того же объекта. Это различие заключается в том, что по известной методике (основанной на определении доверительного интервала по критерию Стьюдента) указанный интервал (погрешность измерения) оказывается зауженным (т.е. оценка является более благоприятной, на самом деле ситуация хуже). Например, были получены следующие два результата измерения по предлагаемой и известной методикам:  $161,67 \pm 14,63$  мкА. и  $161,67 \pm 11,71$  мкА. Видно, что по известной методике (Стьюдента) погрешность измерения меньше на 20 %: вместо  $\Delta A = 14,63$  мкА имеем  $\Delta A = 11,71$  мкА. Следовательно, пользуясь известной методикой (более простой) необходимо иметь ввиду, что на самом деле погрешность измерения больше.

Учитывая, что в практике компьютерной диагностики, например, диагностики автомобилей погрешность измерения не оценивается, рассмотрим подробно применение известной методики (Стьюдента). Полученные при этом результаты оценки необходимо корректировать в соответствии с установленным различием [1].

В качестве примера выполним оценку погрешности измерения компрессии в цилиндрах ДВС автомобиля ВАЗ 21063 (1988 года выпуска).

При 4-х кратном измерении давления в каждом из 4-х цилиндров ДВС, были получены следующие данные (таб.1).

Таблица 1

Номер опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
1	9,8	9	9,45	8,5
2	9,7	9,45	9,5	9,15
3	9,6	9,45	9,5	9,15
4	9,45	9,2	9,55	8,8

Примечание. 1. X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub>, X<sub>4</sub> – результаты измерения компрессии в 1,2,3, 4 цилиндрах, кг/см<sup>2</sup> (для перевода данных в МПа необходимо разделить результаты измерений на 10). 2. Измерения выполнены манометром МП-63: шкала 0...1,6 МПа, цена деления 0,05 МПа, класс точности прибора 2,5.

Рассчитывают среднее значение (по имеющимся результатам 4-кратных измерений) и среднеквадратическое отклонение, которые находят по следующим формулам [2]. Среднее значение:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1)$$

где  $x_i$  –  $i$ -е измерение давления ( $1 \leq i \leq 4$ ) в цилиндре,  $n$  – количество (кратность) измерений,  $n = 4$ .

Среднеквадратическое отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2)$$

Доверительный интервал  $\Delta x$  (находят при определённой доверительной вероятности  $P$  при кратности измерений  $n$  по критерию Стьюдента)

$$\Delta x = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \cdot t. \quad (3)$$

### Расчёт для первого цилиндра.

Используем для расчёта первый столбик в табл.1. По формуле (1) получим  $\bar{x} = 9,64$  кгс/см<sup>2</sup>. Для расчёта  $\sigma$  по формуле (2) составим табл. 2.

Таблица 2

Номер опыта	$X_1, \text{кгс/см}^2$	$(x_i - \bar{x})$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	9,8	0,16	0,0256
2	9,7	0,06	0,0036
3	9,6	0,04	0,0016
4	9,45	0,19	0,0361

С учётом данных табл.2 получим по формуле (3)  $\sigma = 0,15$  кгс/см<sup>2</sup>.

При  $P = 0,9$  и  $n = 4$  определяем коэффициент Стьюдента  $t = 2,35$ . Далее по формуле (3) находим доверительный интервал

$$\Delta x = \pm \frac{0,15}{\sqrt{4}} \cdot 2,35 = 0,18 \text{ кгс/см}^2.$$

Это значит, что верхняя и нижняя границы параметра будут составлять:

$X_{\text{в}} = \bar{x} + \Delta x = 9,64 + 0,18 = 9,82$ ;  $X_{\text{н}} = \bar{x} - \Delta x = 9,64 - 0,18 = 9,46$ , т.е. давление в первом цилиндре составляет  $P_1 = 9,64 \pm 0,18$  кгс/см<sup>2</sup>. Относительная погрешность 3,7 % ( $\frac{0,36}{9,64} \cdot 100\%$ ).

Для следующих цилиндров проведём аналогичные расчеты.

### Расчёт для второго цилиндра (табл. 3).

Таблица 3

Номер опыта	$X_2, \text{кгс/см}^2$	$(x_i - \bar{x})$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	9	0,275	0,076
2	9,45	0,175	0,031
3	9,45	0,175	0,031
4	9,2	0,075	0,006

По формулам (1) и (2), соответственно, получим  $\bar{x} = 9,28$  кгс/см<sup>2</sup> и  $\sigma = 0,2$  кгс/см<sup>2</sup>. Доверительный интервал по формуле (3) составляет:

$$\Delta x = \pm \frac{0,2}{\sqrt{4}} \cdot 2,35 = 0,235 \text{ кгс/см}^2.$$

Это значит, что верхняя и нижняя границы параметра будут составлять:

$X_{\text{в}} = \bar{x} + \Delta x = 9,28 + 0,235 = 9,515$ ;  $X_{\text{н}} = \bar{x} - \Delta x = 9,28 - 0,235 = 9,045$ , т.е. давление во втором цилиндре составляет  $P_2 = 9,28 \pm 0,235$  кгс/см<sup>2</sup>. Относительная

погрешность 5 %.

**Расчет для третьего цилиндра (табл. 4).**

Таблица 4

Номер опыта	$X_3$ , кгс/см <sup>2</sup>	$(x_i - \bar{x})$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	9,45	0,0500	0,0025
2	9,5	0,0000	0,0000
3	9,5	0,0000	0,0000
4	9,55	0,0500	0,0025

По формулам (1) и (2), соответственно, получим:  $\bar{x} = 9,5$  кгс/см<sup>2</sup> и  $\sigma = 0,04$  кгс/см<sup>2</sup>. Доверительный интервал по формуле (3) составляет:

$\Delta x = \pm \frac{0,04}{\sqrt{4}} \cdot 2,35 = 0,047$  кгс/см<sup>2</sup>. Это значит, что верхняя и нижняя границы будут составлять:  $X_{в} = \bar{x} + \Delta x = 9,5 + 0,047 = 9,547$ ;  $X_{н} = \bar{x} - \Delta x = 9,5 - 0,047 = 9,453$ , т.е. давление в третьем цилиндре составляет  $P_3 = 9,5 \pm 0,047$  кгс/см<sup>2</sup>. Относительная погрешность 1 %.

**Расчёт для четвертого цилиндра (табл. 5).**

Таблица 5

Номер опыта	$X_4$ , кгс/см <sup>2</sup>	$(x_i - \bar{x})$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	8,5	0,4000	0,1600
2	9,15	0,2500	0,0625
3	9,15	0,2500	0,0625
4	8,8	0,1000	0,0100

По формулам (1) и (2), получим:  $\bar{x} = 8,9$  кгс/см<sup>2</sup> и  $\sigma = 0,3$  кгс/см<sup>2</sup>. Доверительный интервал по формуле (3) составляет:  $\Delta x = \pm \frac{0,3}{\sqrt{4}} \cdot 2,35 = 0,353$  кгс/см<sup>2</sup>. Это значит, что верхняя и нижняя границы будут составлять:  $X_{в} = \bar{x} + \Delta x = 8,9 + 0,353 = 9,253$ ;  $X_{н} = \bar{x} - \Delta x = 8,9 - 0,353 = 8,547$ , т.е. давление в четвертом цилиндре составляет  $P_3 = 8,9 \pm 0,353$  кгс/см<sup>2</sup>. Относительная погрешность 7,9 %. Результаты исследования сведены в табл. 6.

Таблица 6

Порядковый номер цилиндра			
1	2	3	4
Номинальное значение давления (компрессия), кгс/см <sup>2</sup>			
9,64	9,28	9,5	8,9
Доверительный интервал при доверительной вероятности $P = 0,9$ , кгс/см <sup>2</sup>			
$\pm 0,18$	$\pm 0,235$	$\pm 0,047$	$\pm 0,353$
Относительная погрешность при $P = 0,9$ , %			
3,7	5,0	1,0	7,9

Из анализа данных, приведенных в табл.6, следует, что лучшим качеством (по уровню и стабильности компрессии) обладают первый и третий цилиндры (нечетные), худшим – второй и четвертый (четные).

**Литература:** 1. Ларшин В.П. Метрологічне забезпечення керуючих комп'ютерних систем у машинобудуванні // Наукові нотатки / Міжвуз. зб. – Луцьк: ЛДТУ, 2004. – Вип. 15 (грудень 2004). – С.154-161. 2. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1972. – 216 с.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ДИГНОСТИКА В СИСТЕМАХ ЧПУ С ОТКРЫТОЙ АРХИТЕКТУРОЙ****Ларшин В.П.,** докт. техн. наук, **Рыбалко А.П.**

(г. Одесса, Украина; г. Москва, Россия)

*Questions of technological diagnostics in systems of numerical program management with open architecture are considered.*

Не подлежит сомнению, что развитие систем ЧПУ (СЧПУ) и автоматизированного проектирования (САПР) относится к числу взаимосвязанных стратегических направлений в современной технологии машиностроения. На протяжении длительного времени (начиная с сороковых годов прошлого столетия) особенностью СЧПУ являлась их закрытая архитектура как по аппаратному (hardware), так и по программному (software) обеспечению этих систем. До сего времени по такому принципу создаются СЧПУ, например, таких известных фирм как Siemens (Германия), Fanuc (Япония), Olivetti (Италия) и других. С точки зрения потребителя, имеющего оборудование и СЧПУ указанных фирм, сотрудничество с этими фирмами не является выгодным из-за высокой стоимости технического обслуживания и ремонта СЧПУ. В тоже время простой оборудования с ЧПУ вынуждает потребителя соглашаться на любые (в том числе экономически невыгодные) условия, которые диктуются этими фирмами. В настоящее время многих потребителей станков с ЧПУ такое экономически зависимое от производителя положение не устраивает. Ситуация усугубляется еще и тем, что системы с закрытой архитектурой обладают ограниченными технологическими возможностями как с точки зрения разработки управляющих программ (математическое обеспечение полностью закрыто), так и с точки зрения диагностики оборудования и управления технологическим процессом. Предлагаемые на рынке отечественные СЧПУ мало отличаются от систем 80-х годов. Они требуют двигатели и электроприводы постоянного тока, а главное – практически не меняют технологические возможности оборудования.

Фирмой ООО Станкоцентр (г. Москва) разработана и серийно выпускается СЧПУ для любого станочного оборудования. Основу этой системы составляет контроллер движения на базе DSP процессора фирмы Motorola. Заложенные идеологические и структурные решения дают практически неограниченную возможность использования этой системы для управления технологическим оборудованием, а именно: универсальными или программируемыми станками, комплексами оборудования, автоматическими и автоматизированными линиями, самым широким спектром технологических процессов. Система имеет открытую архитектуру. На верхнем уровне СЧПУ находится IBM PC, задачей которого является стандартный интерфейс: аппаратный, программный и пользовательский. Стандартный аппаратный интерфейс позволяет использовать стандартные периферийные устройства для IBM PC в СЧПУ для её расширения и модернизации. Это сетевые карты и модемы для передачи информации от станка в сервисный или управляющий центр и обратно, дополнение системы дисковыми и другими устройствами, замена практически любых вышедших из строя или устаревших элементов IBM PC (что может сделать сам потребитель без участия изготовителя СЧПУ). Массовый выпуск этих элементов самыми различными специализированными производителями позволяет резко снизить стоимость всего комплекса и повысить надёжность машины управления в

целом, благодаря обязательному тестированию и гарантированию надёжной работы элементов производителями. Острая конкуренция на рынке комплектующих IBM PC приводит к быстрому удешевлению элементов и их очень быстрому прогрессу, а стандартизация интерфейса приводит к обязательной взаимной совместимости этих элементов. Кроме того, достигается важная цель - независимость потребителя СЧПУ от её производителя. Приобретение любого компонента IBM PC сегодня не представляет проблему. При выбранной концепции построения СЧПУ, станок превращается в диагностический комплекс, который можно использовать как для диагностики самого станка (сборки узлов, состояния деталей и механизмов на станке, смазки, вибраций и т.п.), так и для диагностики и отработки технологических процессов. В том числе для выбора оптимальных режимов резания (при задании определенных параметров управления и оптимизации). Параметром управления может быть, например, постоянная сила резания. При этом автоматически учитывается износ инструмента, изменение величины съёма материала. Возможно управление по постоянному рассогласованию или постоянной ошибке на профиле, при этом режимы резания могут выбираться автоматически. Применительно к операциям шлифования становится возможной диагностика технологической системы по температурному критерию в зоне резания или по температурным деформациям обрабатываемых деталей.

Современный металлорежущий станок, работая при больших рабочих подачах и высокой скорости резания, должен обеспечивать устойчивый процесс резания, что без самообучающейся математической модели в контуре электропривода невозможно обеспечить, так как изменяющиеся параметры резания и самого станка могут привести к неустойчивости процесса резания. Поэтому система управления должна очень быстро реагировать на возникновение таких ситуаций. Чем раньше она получит информацию о состоянии процессов, происходящих на станке, тем выше качество управления. Поэтому выбрана структура системы управления, когда на одном процессоре реализована СЧПУ, контроллер электроавтоматики и управляющая часть электропривода. Это позволяет использовать контуры тока и скорости, которые во много раз быстрее контура положения, для эффективного управления и диагностики. Отличительной особенностью СЧПУ является применение обыкновенного асинхронного двигателя в высокоточном электроприводе главного и вспомогательного движения, что позволяет компенсировать погрешности оборудования.

Использование в СЧПУ стандартного программного обеспечения Windows позволяет потребителю самостоятельно разрабатывать необходимые программы на общепринятых языках программирования (C++, Паскаль и многих других). Кроме того, СЧПУ имеет возможность непосредственной стыковки с имеющимися Windows-совместимыми САПР технологического назначения (Компас Автопроект, Master-CAM, T-Flex и другими), что уменьшает трудоемкость программирования и отладки программ. В качестве примера на рис.1 и рис.2 показаны осциллограммы, соответственно, при задании в СЧПУ шагового движения и реакция квадратурного тока на изменение силы резания.

Проведённый анализ быстродействия и чувствительности квадратурного тока показал, что этот ток является эффективным источником информации для технологической диагностики процесса резания и для управления процессом не только по параметрам программируемых движений на станке с ЧПУ, но также для оценки силы и

температуры резания. Последнее позволяет разрабатывать (на основе использования этой информации) самообучающиеся системы встроенной технологической диагностики.

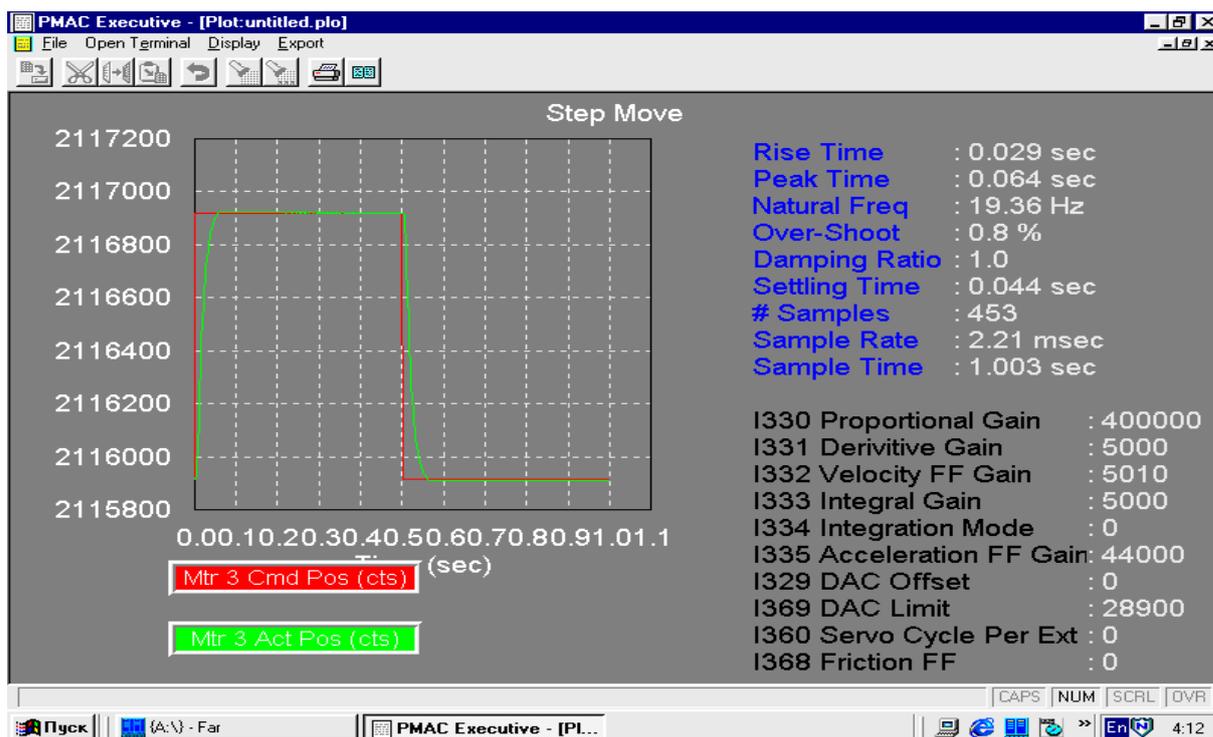


Рис.1. Задание шагового движения в системе PMAC управления асинхронным электродвигателем станка с ЧПУ.

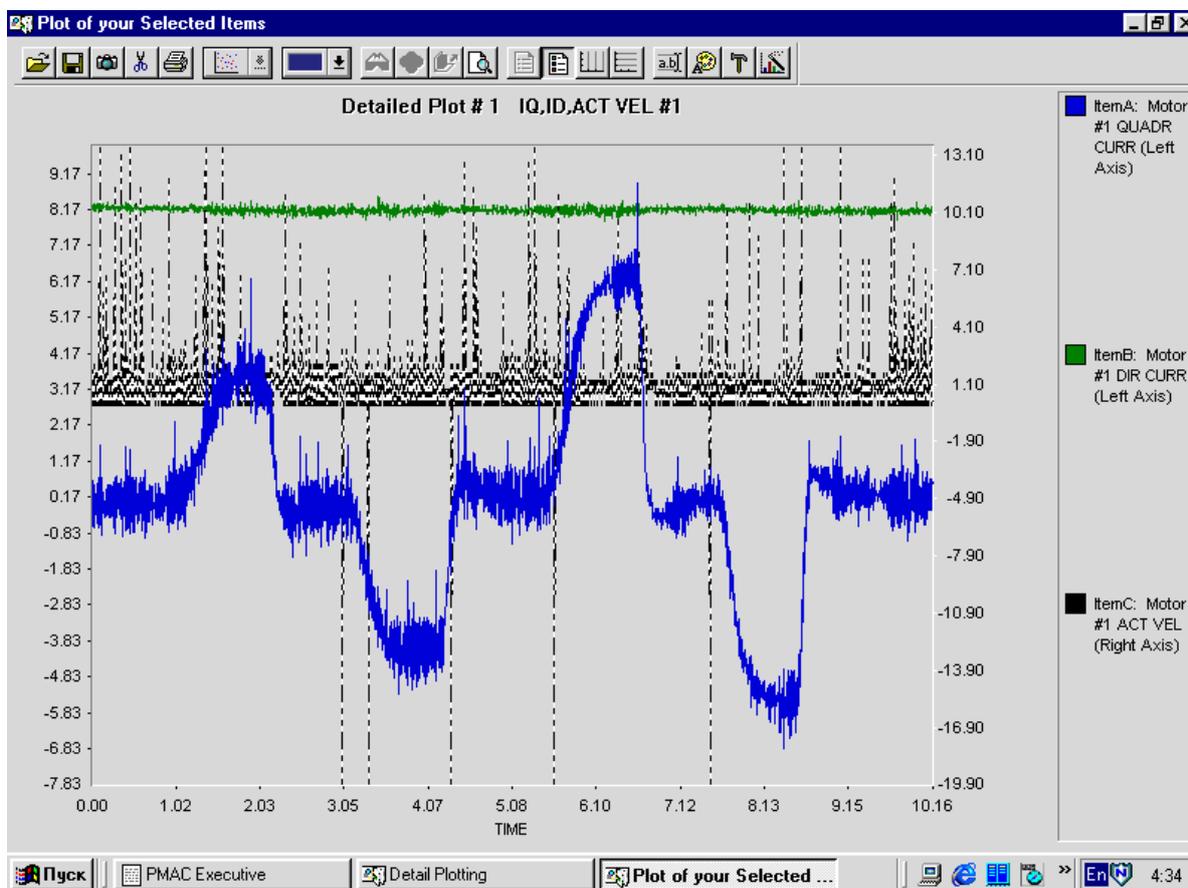


Рис.2. Осциллограммы квадратурного тока, используемого для автоматического регулирования движения инструмента и диагностики процесса резания на станке с ЧПУ при изменении нагрузки на инструменте (момента силы на шпинделе).

**Литература:** 1. Рыбалко А.П., Ларшин В.П. Новое поколение станков с ЧПУ – новые технологические возможности обеспечения качества деталей / Технологическое управление качеством поверхности деталей машин: Мат. междунар. научн.-техн. конф.– Киев, АТМ Украины, 2003. – С. 83-86.

УДК 629.735.33.033

## ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОТАЙНЫХ И НЕПОТАЙНЫХ ЗАКЛЕПОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ КЛЕПКЕ

Чистяк В.Г., канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)

*Questions of quality of connections are considered.*

Определяющим качеством заклепочных соединений был принят общепризнанный критерий их ресурса и герметичности – величина радиального натяга и характер его распределения по толщине пакета соединяемых деталей.

Для исследований применялись экспериментальные панели, имитирующие типовые конструкции продольных заклепочных швов фюзеляжей, панелей крыльев, которые соответствуют наиболее распространенным сочетаниям материалов пакетов и заклепок, применяемых в самолетостроении. Толщина пакета  $S = d = 4 \text{ мм}$ , материал деталей – Д16Т, заклепок – В65. Образцы закреплялись по периметру на жестком каркасе. Клепка выполнялась импульсными пневматическими МПИ-90 с обжимкой (массой  $m_0 = 0,16 \text{ кг}$  и радиусом полусферической лунки  $R_{C\Phi} = d = 4 \text{ мм}$ ) и многоударными КМП-23 молотками, применяя характерный при стапельной сборке обратный метод клепки. Для сравнения клепались также аналогичные образцы на прессе КП-204М.

Отверстия в пакетах выполнялись сверлом-разверткой  $\varnothing 4,05 \text{ Н9}$  с последующим зенкованием потайных гнезд. Припуск стержня для замыкающей головки был равным 5 мм. Оценивалось качество соединений по средним значениям измерений не менее 20-ти заклепок.

Исследовались величина радиального натяга и характер его распределения в цилиндрической части отверстия пакета, а также в конических гнездах для потайных соединений.

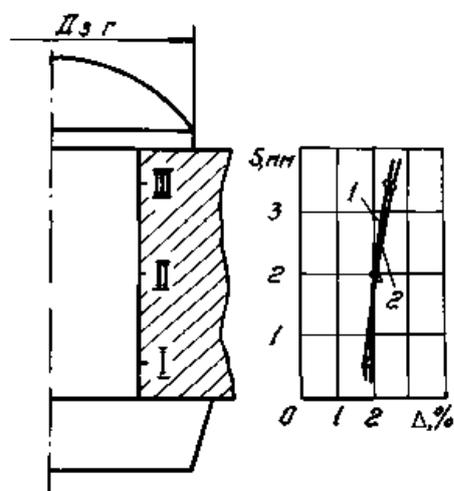


Рис. 1. Влияние массы поддержки на распределение радиального натяга в соединениях, выполненных импульсной клепкой (заклепка ЗП-4-9).

Исследования влияния на величину и на характер распределения радиального натяга массы поддержки проводились для непотайных соединений, выполняемых заклепками типа ЗП-4-9 с поддержками массой  $m_n = 0,7$  и 25 кг. В целях уменьшения дополнительного влияния пластических деформаций закладных головок применялись поддержки с лунками по форме головок, ограничивающими деформации последних в процессе клепки. Было установлено, что при степенях осадки замыкающих головок заклепок близких к номинальным ( $\bar{D}_{3,2} \approx 6,35 \dots 6,38 \text{ мм}$ ), и при незначительных осадках закладных голо-

вок ( $\bar{\alpha}_n < 0,02$  мм) средняя величина радиальных натягов в пакетах для исследуемых случаев сохраняется в пределах  $\bar{\Delta} \approx 2...2,1\%$  (рис.1). Наблюдалось незначительное увеличение натяга в области закладных головок при клепке с минимальной массой поддержки ( $m_n=0,7$  кг,  $n = \frac{m_n}{m_0} = 4,4$ ). Однако, расхождение в натягах при клепке

поддержками, с отличающимися более чем в 30 раз их массами ( $m_n=0,7$ кг – кривая 1 и  $m_n=25$ кг – кривая 2, рис.1), незначительно, и практического интереса не представляет.

Так как влияния изменяемой в широких пределах массы поддержки на величину натяга не установлено, то при экспериментах применялись поддержки массой  $m_n=2...2,5$  кг, приемлемой по условиям труда клепальщиков.

Анализ результатов, представленных на рис. 2 и 3, показывает, что импульсная клепка обеспечивает повышение радиального натяга для непотайных заклепок типа ЗП в 2...4 раза, а для ЗУ, применяемых в потайных соединениях, – до 2,5 раз по сравнению с многоударной (обратным методом) и прессовой клепкой.

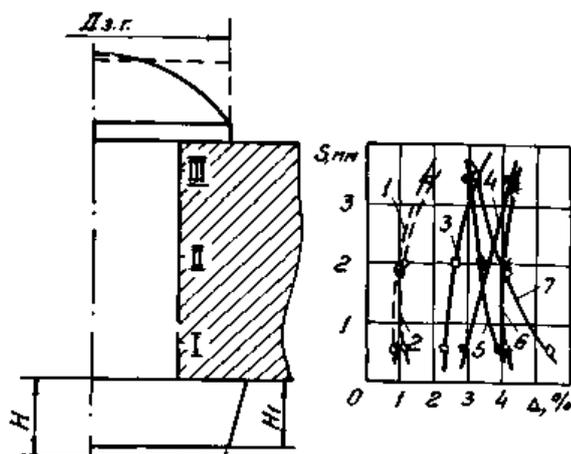


Рис.2. Распределение радиального натяга в соединениях, выполненных заклепками ЗП–4-9: 1 – многоударной клепкой  $D_{з.г.}=6,4$  мм; 2 – прессовой  $D_{з.г.}=6,44$  мм; 3 и 4 – импульсной (поддержка с лункой ЗП)  $D_{з.г.}=6,45$  мм и  $D_{з.г.}=6,56$  мм; 5, 6 и 7 – импульсной клепкой, соответственно:  $D_{з.г.}=6,43$  мм,  $D_{з.г.}=6,59$  мм и  $D_{з.г.}=6,8$  мм.

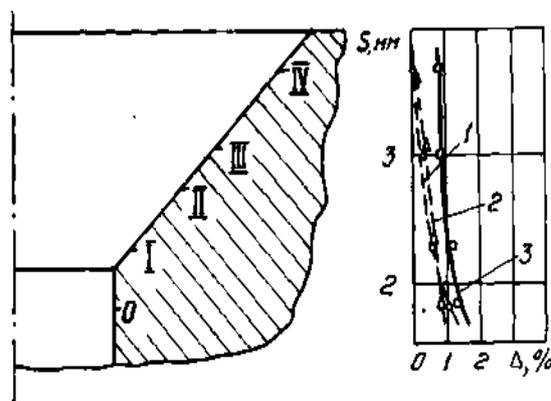


Рис.3. Распределение радиального натяга в области потайного гнезда для соединений, выполненных заклепками ЗУ–4-9: многоударной клепкой ( $D_{з.г.}=6,38$  мм) –1; прессовой клепкой ( $D_{з.г.}=6,3$  мм) –2; импульсной клепкой ( $D_{з.г.}=6,34$  мм) –3.

Применение при импульсной клепке заклепками ЗП поддержки с лункой, ограничивающей деформирование закладной головки, снижает величину радиального натяга в ее области в 1,5 раза по сравнению с натягом в области замыкающей головки (рис. 3, кривые 3 и 4). Клепка ЗП с поддержкой, содержащей гладкую рабочую поверхность, при образовании полукруглых замыкающих головок за счет повышения технологического усилия их стесненного деформирования сопровождается значительной деформацией закладных головок (допускается до  $\alpha_n=0,1d$ ). Благодаря этому повышается радиальный натяг в области закладных головок, улучшается равномерность его распределения в пакете (рис.3, кривые 5 и 6). Убедительно иллюстрируют влияние деформации закладной головки заклепки на распределение ра-

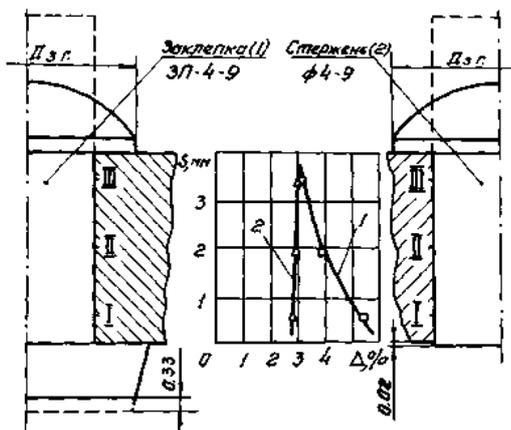


Рис. 4. Влияние деформации закладной головки заклепки на распределение радиального натяга при импульсной клепке ( $m_n = 2,5 \text{ кг}$ ,  $D_{з.г.} = 6,8 \text{ мм}$ ).

диального натяга графики (рис.4), построенные по результатам исследований импульсной клепки заклепками ЗП-4-9 и соответствующими стержнями  $\text{Ø}4 \text{ мм}$ . При клепке применялась поддержка с плоской рабочей поверхностью ( $m_n = 2,5 \text{ кг}$ ), форма замыкающей головки – полукруглая ( $D_{з.г.} = 6,8 \text{ мм}$ ). Из графиков видно, что импульсная клепка обеспечивает практически равномерное распределение натяга для стержня (кривая 2), деформация же закладной головки ЗП ( $\bar{\alpha}_n = 0,33 \text{ мм}$ ) способствует дополнительному росту натяга в ее области на 2,5 %.

Таким образом, на величину и характер распределения радиального натяга, наряду с высокими скоростями течения стержня заклепки, определяющее влияние оказывает пластическая деформация ее закладной головки. Это подтверждает правильность направления совершенствования соединений внедрением конструкций высококачественных заклепок с пластически деформируемыми компенсаторами.

УДК 621.91.01

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПРОЧНЕНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ РЕЗЦОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА

Мощенок В.И., канд. техн. наук, проф., Лалазарова Н.А., канд. техн. наук, Путьгина Л.И., канд. техн. наук, (г. Харьков, Украина)

*An effective method to harden hard-carbide tools for treatment of high strength cast iron with a spheroidal graphite details by vibroabrasive treatment and shot blasting.*

**СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.** В качестве материала деталей двигателей автомобилей, тракторов, комбайнов всё более широкое применение находит высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧШГ), который сочетает технологичность серого чугуна с комплексом свойств более высоких, чем у ковкого чугуна и в ряде случаев даже литой и ковкой стали [1]. Высокопрочный чугун является перспективным конструкционным материалом. За последние 20 лет его производство возросло более чем в 15 раз.

Получение высокого уровня механических и эксплуатационных характеристик ВЧШГ позволяет заменить материал большой группы деталей, изготавливаемых ранее из литой и ковкой стали, серого и ковкого чугунов, на высокопрочный. Благодаря наличию большого количества структур металлической матрицы высокопрочный чугун может иметь разнообразный комплекс свойств, который создаётся различными видами термической обработки. Однако процесс более широкого внедрения ВЧШГ сдерживается невысоким уровнем его обрабатываемости.

**МАТЕРИАЛ, МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА.** Высокопрочные чугуны отличаются значительной прочностью и твёрдостью, неоднородностью структуры, что и приводит к снижению обрабатываемости.

При обработке всех чугунов наблюдаются следующие формы износа у резцов из твёрдых сплавов: износ по задней поверхности, небольшая лунка износа по передней поверхности, опускание вершины, размерный износ.

В литом состоянии ВЧШГ отличается большой неоднородностью как по структуре, так и по химическому составу, что способствует интенсификации усталостного изнашивания твёрдых сплавов, в частности, ВК8 [2]. Имеет место выкрашивание режущей кромки. Циклические нагрузки способствуют периодическому изменению на контактных поверхностях режущего инструмента касательных и нормальных напряжений. Эти напряжения неодинаково воздействуют на неоднородную структуру твёрдого сплава вследствие различия в свойствах фаз связки и карбидов. Изнашивание твёрдого сплава в области больших стойкостей происходит или в результате усталостного разрушения зёрен карбидов, с изнашиваемой поверхности которых удаляются мелкие частицы, или за счёт удаления зёрен карбидов в результате усталостного разрушения связки.

Одним из методов повышения обрабатываемости является повышение надёжности режущего инструмента упрочнением поверхностным пластическим деформированием (ППД). ППД применяется, если велик процент отказов инструментов в связи с выкрашиванием. Наиболее отработанными методами упрочнения ППД для твердосплавного инструмента являются виброабразивное и дробеструйное упрочнение.

В связи с этим целью настоящей работы является выбор оптимального метода упрочнения резцов из ВК8, которые применяются при обработке высокопрочного чугуна.

Технология упрочнения поверхностным пластическим деформированием основана на влиянии ППД на структуру и свойства твёрдого сплава, а также на микро-рельеф поверхности и радиус округления режущей кромки [3].

В литературе имеются сведения об эффективном использовании виброабразивного и дробеструйного упрочнения инструмента для точения и фрезерования сталей, титановых сплавов, серого чугуна. Сведений об использовании этих видов упрочнения инструмента для обработки ВЧШГ в литературе нет [3].

В связи с этим исследовали точение ВЧШГ после виброабразивной и дробеструйной обработки. Резцы с механическим креплением пятигранных пластин из ВК8 имели следующие геометрические параметры:  $\varphi=60^\circ$ ,  $\varphi_1=10^\circ$ ,  $\gamma=-8^\circ$ ,  $\alpha=8^\circ$ . Пластины доводили по передним и опорным поверхностям порошком карбида бора, задние поверхности находились в состоянии поставки (после спекания), радиус округления кромок 8-10 мкм.

Отливки ВЧШГ диаметром 100 мм и длиной 400 мм подвергали нормализации, твёрдость 280 НВ, структура перлит + феррит.

Виброабразивное упрочнение является результатом ударов частиц наполнителя по инструменту, засыпанному вместе с наполнителем в вибрирующий контейнер. 15-20 % объёма контейнера загружают инструментом, 70-75 % – наполнителем (бой абразивных кругов). Свойства инструмента при виброабразивном упрочнении повышаются за счёт оптимального радиуса округления режущих кромок и вершин, малой шероховатости режущих поверхностей и кромок, благоприятного рельефа поверхности, а также наклёпа, аллотропических превращений и остаточных напряжений в поверхностном слое до 0,01 мм [4].

Виброабразивную обработку проводили на специальной виброабразивной установке ВМ40С, с камерой объёмом 40 л, предназначенной для упрочнения твердосплав-

ных пластин, напайных резцов и ножей фрез. Установки отличаются производительностью, низким уровнем шума, удобством обслуживания, отсутствием вредных экологических воздействий. Пластины упрочняли в среде боя абразивных кругов грануляции 10-20 мм массой 60 кг, с частотой 46 гц, амплитудой 0,6 мм. Все пластины упрочняли одновременно с непрерывной промывкой содовым раствором. При контроле на микроскопе МИС-11 отклонения радиуса не превышали 10 %, выкрашивание и другие дефекты отсутствовали, шероховатость режущих кромок и поверхностей значительно улучшилась, поверхность после упрочнения – матовая.

Дробеструйное упрочнение основано на воздействии струи стальной или чугунной дроби на режущие поверхности инструмента. Прочность инструмента после дробеструйной обработки повышается за счёт остаточных напряжений сжатия на глубине до 0,3 мм. Меньшую роль играет наклёп, аллотропическое превращение кобальта, удаление дефектного поверхностного слоя, небольшое округление кромок и вершин, релаксация межфазных напряжений [5].

Дробеструйное упрочнение проводили на специальной инструментальной установке с дробемётным колесом диаметром 350 мм с частотой вращения 3600 мин<sup>-1</sup>. Одновременно упрочняли 6 пластин, закреплённых на крышке установки в специальном приспособлении дробью ДЧК-0,3 без СОТС.

В качестве характеристики обрабатываемости использовали стойкость инструмента Т (мин). Режим резания: t=0,4 мм; S=0,07 мм/об; V=5,2 м/с. Параметры износа измеряли на инструментальном микроскопе с точностью 0,01 мм. Критерий износа (0,6 мм), величина стойкости (7-20 мин) и уровень режимов резания были близки к применяемым на производстве. Для сокращения трудоёмкости экспериментов скорость резания была несколько форсирована, каждый опыт повторяли 4 раза.

Испытания на прочность осуществляли ступенчатым увеличением подачи до разрушения пластины – S<sub>p</sub> (мм/об). При глубине резания 2,5 мм и скорости резания 0,32 м/с подачу повышали от 0,78 мм/об согласно ряду подач станка, каждый опыт повторяли 10 раз. Размеры и рельеф разрушений были близкими к полученным при точении серого чугуна. Разрушение имело характер хрупкого скола по сечению режущей пластины.

Пластины испытывали на станке 16К625 при продольном точении без СОТС.

Зависимость периода стойкости инструмента, подвергнутого виброабразивной обработке, от радиуса округления лезвия имела характер параболы с максимумом ρ=20

мкм (рис. 1). Увеличение округления до 30-40 мкм немного снижает стойкость, а при ρ=70 мкм стойкость снижается в 1,9 раз. Такое влияние радиуса округления режущей кромки объясняется тем, что площадь контакта при резании чугуна значительно меньше, чем у стали. Округление приводит к дальнейшему уменьшению площади контакта, увеличению контактных нагрузок.

В результате испытаний на разрушающую подачу также была получена

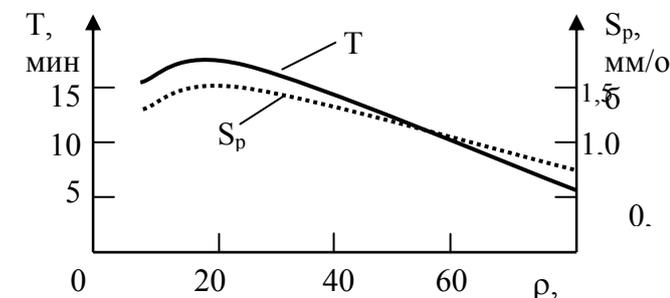


Рис. 1. Влияние округления режущей кромки на стойкость и прочность инструмента.

на параболическую зависимость от радиуса округления с максимумом прочности инструмента при радиусе 20 мкм. Округление 40 мкм снижает разрушающую подачу не-

значительно, а 70 мкм – в 1,5 раза. Это объясняется, видимо, большим отношением радиальной составляющей силы резания к тангенциальной при точении чугуна по сравнению со сталью. Округление, как известно, ещё более увеличивает это отношение, отрицательно сказываясь на прочности инструмента.

Дробеструйное упрочнение не повлияло на период стойкости инструмента (рис. 2), но повлияло на его прочность.

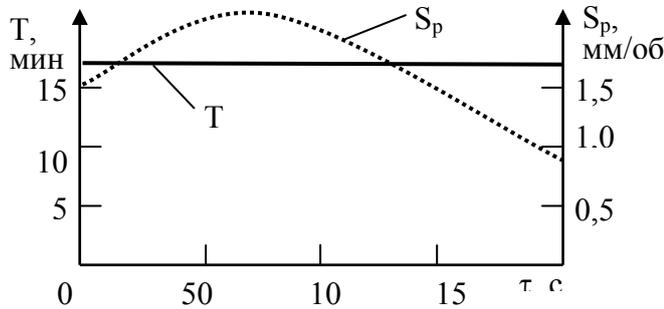


Рис. 2. Влияние времени обработки дробью на стойкость и прочность инструмента.

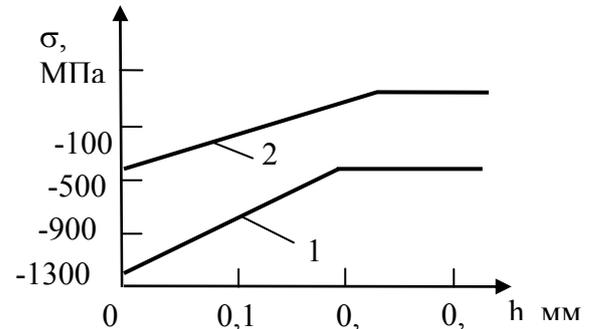


Рис.3. Распределение остаточных макронапряжений  $\sigma$  по глубине поверхностного слоя  $h$  твердого сплава ВК8 после дробеструйной обработки: 1 – карбид вольфрама; 2 – кобальтовая фаза.

Зависимость разрушающей подачи от режимов упрочнения дробью, как и в предыдущем случае, описывали параболой. Максимум при продолжительности обработки дробью 80 с соответствовал увеличению прочности в 1,4 раза. Это связано с возникновением остаточных напряжений сжатия, повышающих прочность твердого сплава, и, соответственно, разрушающую подачу (рис. 3).

Дробеструйное упрочнение твердосплавного инструмента является эффективным средством улучшения обрабатываемости деталей из ВЧШГ благодаря повышению надёжности инструмента за счёт небольшого округления режущих кромок и создания остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое. Уровень сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое достигает для карбидной фазы 1200 МПа, а для кобальтовой фазы – 400 МПа.

#### Выводы:

1. Обработка высокопрочного чугуна сопровождается выкрашиванием твердого сплава ВК8 при точении ВЧШГ, что связано с нестабильностью процесса резания, обусловленной неоднородностью структуры чугуна.
2. Виброабразивное упрочнение твердого сплава приводит к повышению стойкости и прочности инструмента, если радиус округления режущих кромок не более 15-20 мкм.
3. Дробеструйное упрочнение твердосплавного инструмента является эффективным средством повышения его надёжности за счёт небольшого округления режущих кромок и остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое.

**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. Лалазарова Н.А. Влияние неоднородности высокопрочного чугуна на его обрабатываемость резанием // Вестник ХГАДТУ. – 2000, №12-13. С. 86-87. 3. Сборный твердосплавный инструмент // Г.Л. Хагт. Прочность режущего инструмента. - М.: Машиностроение, 1989.-256 с. 4. Гах В.М. Повышение режущих свойств твердосплавного инструмента путём виброабразивной обработки/ Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. - Ростов-на-Дону: РИСХМ, 1990.-24 с. 5. Хагт Л.Г., Гах В.М., Левин В.Л. Упрочнение твердосплавного инструмента поверхностным деформированием. - М.: НИИмаш, 1981.-54 с.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ НАЗНАЧЕНИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА МНОГОЦЕЛЕВЫХ СТАНКАХ

**Карпусь В.Е.**, докт. техн. наук, **Миненко Д.А.** (г. Харьков, Украина)

*Intercommunication is set between optimum firmness of instruments at the sequential processing by the kit of tools and parameters of treatment on much instrumental machine tools. The method of choice of the optimum modes of treatment by the kit of cutting tools, which answers the burst performance of treatment on much instrumental machine-tools, is resulted.*

Эффективность использования высокоавтоматизированного металлорежущего оборудования в серийном производстве достигается за счет его высокой производительности, гибкости и точности. К такому оборудованию относятся многоцелевые станки (МС). Так, на станках типа «Супер-Центр», производства ОАО «Ивановский завод тяжелого станкостроения» за счет высокой максимальной частоты вращения шпинделя (12000 об/мин), наличия у шпиндельной бабки двух угловых координат, замены дискретного позиционирования стола на дополнительную управляемую круговую координату, достигается 3- 4-х кратное повышение производительности. Высокую частоту вращения шпинделя имеют и другие МС, например, горизонтальные МС моделей: ИР320ПМ1Ф4 Львовского завода фрезерных станков – 6000 об/мин; ОП2М04АМФ4М Одесского ПО прецизионного станкостроения «Микрон» - 5000 об/мин; 2А459АМФ4 Куйбышевского станкостроительного ПО – 3150 об/мин; а также вертикальные МС моделей: ГД2В04ПМФ4М Гомельского станкостроительного завода – 5000 об/мин; СС2В05ПМФ4 Стерлитамакского станкостроительного завода – 6000 об/мин; 6М612МФ4 Минского станкостроительного ПО – 3600 об/мин.

Максимальная частота вращения шпинделя на обрабатывающих центрах компании CHIRON (Германия) составляет 10500 об/мин (модели FZ15S и DZ15W) и 12000 об/мин (модели FZ15KW, FZ15KS и DZ15KW); компания DECKEL MAHO (Германия) производит вертикальные МС моделей DMC 104 V linear и DMC 64 V linear – 12000 об/мин.

Высокая стоимость подобного оборудования обуславливает высокую стоимость станкоминуты, что требует максимального использования его технических возможностей. Анализ технических характеристик современных многоцелевых станков подтверждает наличие конструктивно-технологических возможностей для осуществления высокоскоростной обработки.

Вместе с тем общемашиностроительные нормативы режимов резания на универсальных и многоцелевых станках с ЧПУ [1] рекомендуют несопоставимо меньшие скорости резания. Следовательно, актуальной является разработка методики выбора наивыгоднейших скоростей резания на многоцелевых станках с учетом конструктивно-технологических особенностей обрабатываемых деталей, обеспечивающих высокопроизводительную обработку и реализацию потенциальных возможностей оборудования.

В качестве критерия оптимальности целесообразно использовать критерий интенсивности формообразования [2], имеющий иерархическую структуру, состоящую применительно к процессу обработки на многоцелевых станках из уровней технологической, цикловой и нормативной интенсивности формообразования.

Технологическая интенсивность формообразования  $W_T$ , мм/мин комплектом режущих инструментов, необходимых для обработки детали, характеризующая фиктивную производительность станка без учета затрат времени на неформообразующие движения и действия

$$W_T = \sum_{i=1}^{N_{II}} n_i \cdot S_{oi},$$

где  $n_i$ ,  $S_{oi}$  – параметры режима резания для  $i$ -го технологического перехода;  $N_{II}$  – число технологических переходов, необходимых для обработки детали, шт.

Цикловая интенсивность формообразования  $W_{II} = W_T \cdot K_{II}$ , мм/мин рассчитывается с учетом цикловых затрат времени на быстрые перемещения детали или инструмента, смену инструмента, установку и снятие детали и др., которые оцениваются с коэффициентом цикловой интенсивности формообразования  $K_{II}$ .

$$K_{II} = \sum_{i=1}^{N_{II}} T_{oi} / \left( \sum_{i=1}^{N_{II}} T_{oi} + \sum_{i=1}^{N_{II}} T_{BIIi} + \sum_{j=1}^{N_K} T_{CTj} + \sum_{j=1}^{N_K} \frac{T_{CMj}}{T_j} \cdot \sum_{i=1}^{N_{II}} T_{oi} + T_{C3} \right),$$

где  $T_{oi}$  – основное (технологическое) время выполнения  $i$ -го перехода, мин;  $T_{BIIi}$  – время быстрых перемещений детали или инструмента, связанных с выполнением  $i$ -го перехода, мин;  $T_{CTj}$  – время смены  $j$ -го инструмента после выполнения технологической задачи, мин;  $T_{CMj}$  – время смены  $j$ -го инструмента после случайного отказа, мин;  $T_j$  – расчетный период стойкости  $j$ -го инструмента, мин;  $N_K$  – количество инструментов в технологически необходимом для обработки детали комплекте, шт;  $T_{C3}$  – время смены заготовки, мин.

Нормативная интенсивность формообразования  $W_H = W_T \cdot K_H$ , мм/мин определяется с учетом внецикловых затрат времени на технологическое и организационное обслуживание рабочего места, на отдых и личные надобности в % от оперативного времени ( $a_{mex}$ ,  $a_{opz}$ ,  $a_{oml}$  соответственно), а также подготовительно-заключительного времени  $T_{II3}$ , которые оцениваются с помощью коэффициента нормативной интенсивности формообразования  $K_H$ :

$$K_H = \sum_{i=1}^{N_{II}} T_{oi} / \left( 1,08 \cdot \left( \sum_{i=1}^{N_{II}} T_{oi} + \sum_{i=1}^{N_{II}} T_{BIIi} + \sum_{j=1}^{N_K} T_{CTj} + \sum_{j=1}^{N_K} \frac{T_{CMj}}{T_j} \cdot \sum_{i=1}^{N_{II}} T_{oi} + T_{C3} \right) + T_{II3} / N_D \right),$$

где  $N_D$  – величина производственной партии изделий, шт.

Используя в качестве критерия оптимальности показатель нормативной интенсивности формообразования нами решалась задача выбора наивыгоднейших режимов резания отвечающих максимальной производительности обработки. При сверлении заготовок с различным сочетанием обрабатываемых материалов и материалов режущих частей инструментов, исследовано влияние различных параметров на оптимальную стойкость комплекта инструментов. Было установлено, что оптимальная стойкость инструмента в значительной степени зависит от числа режущих инструментов в комплекте и времени смены одного инструмента. На рис. 1 показаны графики зависимости оптимальной стойкости инструментов от времени смены одного инструмента и числа инструментов в комплекте.

Значительное влияние на оптимальный период стойкости и на интенсивность формообразования оказывает время замены инструмента. Возможны два варианта

замены инструмента: плановая замена, производится в случае, когда инструмент отработал расчетный период стойкости и на его замену тратится время  $T_{ПЛ}$ ; замена инструмента по отказу, производится в случае, когда инструмент не отработал расчетный период стойкости, а заменяется по причине отказа, и на его замену тратится время  $T_{ОТ}$ . При плановой замене инструментов для  $N_K=20$ ,  $T_{ПЛ}=0,2$  мин, оптимальная стойкость составляет  $T_{ОПТ}=16$  мин, нормативная интенсивность формообразования составляет  $W_H=1721$  мм/мин, а при замене инструментов по отказу  $T_{ОТ}=1,2$  мин,  $T_{ОПТ}=96$  мин,  $W_H=1611$  мм/мин. Вариант смены инструмента зависит от его

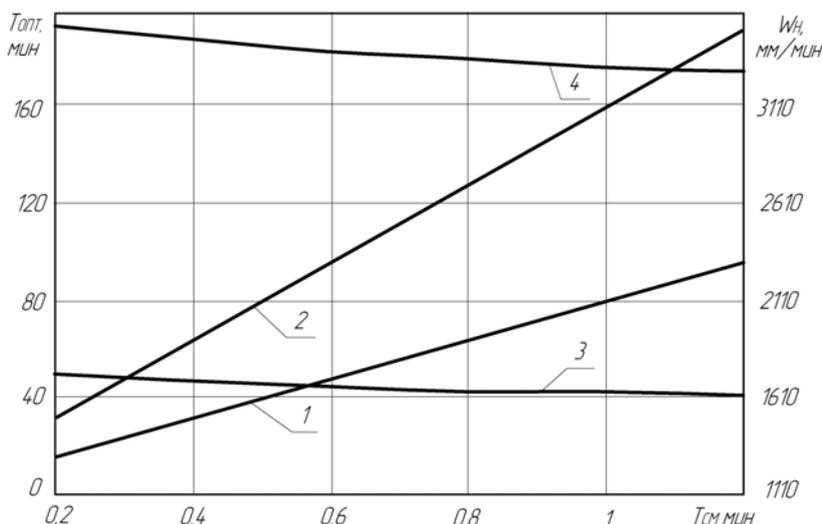


Рис. 1. Графики зависимости оптимальной стойкости инструментов и нормативной интенсивности формообразования от времени смены одного инструмента и числа инструментов в комплекте при обработке чугуна СЧ 20 сверлами ВК8: 1 –  $T_{ОПТ}$ ,  $N_K=20$ ; 2 –  $T_{ОПТ}$ ,  $N_K=40$ ; 3 –  $W_H$ ,  $N_K=20$ ; 4 –  $W_H$ ,  $N_K=40$ .

работы инструмента и времени его безотказной работы на практике используют распределение случайных величин Вейбулла [3]. В результате моделирования работы комплекта инструментов состоящего из 20 сверл получены зависимости числа инструментов в комплекте заменяемых планово  $N_{КПЛ}$ , с временем замены  $T_{ПЛ}$  и по

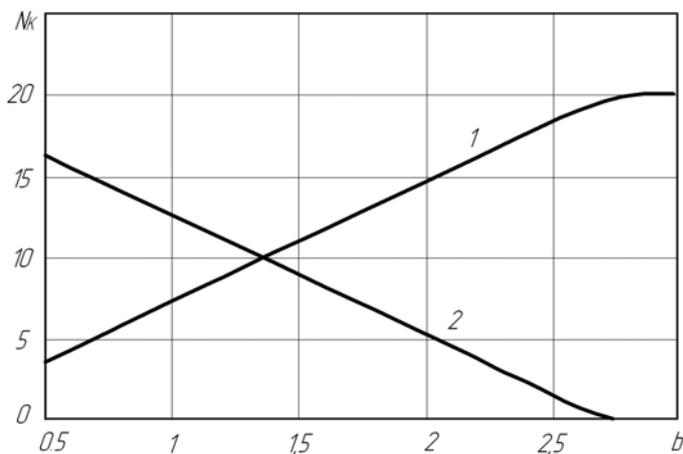


Рис. 2. Зависимости числа инструментов в комплекте  $N_K=20$  заменяемых: 1 – планово  $N_{КПЛ}$ , с временем замены  $T_{ПЛ}$ ; 2 - по отказу  $N_{КОТ}$ , с временем замены  $T_{ОТ}$  от параметра  $b$ .

надежности, определяемой стойкостью, которая является случайной величиной и при одной и той же скорости резания может принимать различные значения в достаточно широком диапазоне, поэтому очевидно, что значения оптимальной стойкости и интенсивности формообразования, полученные в результате детерминированных расчетов будут менее достоверными, чем определенные с помощью вероятностного моделирования.

При расчетах надежности инструментов, с временем замены  $T_{ОТ}$  от параметра  $b$  – определяющего форму кривой распределения и характеризующего надежность режущего инструмента, графики которых показаны на рис. 2.

С учетом вероятностного моделирования числа инструментов заменяемых одним из вариантов формула для определения коэффициента нормативной интенсивности примет вид

$$K_H^* = \sum_{i=1}^{N_D} T_{O_i} / \left( 1,08 \cdot \left( \sum_{i=1}^{N_D} T_{O_i} + \sum_{i=1}^{N_D} T_{БП_i} + \sum_{j=1}^{N_K} T_{СТ_j} + \left( \sum_{j=1}^{N_{КДЛ}} \frac{T_{ПД_j}}{T_j^*} + \sum_{j=1}^{N_{КОТ}} \frac{T_{ОТ_j}}{T_j^*} \right) \cdot \sum_{i=1}^{N_D} T_{O_i} + T_{СЗ} \right) + T_{ПЗ} / N_D \right),$$

Нормативная интенсивность формообразования с учетом вероятностного моделирования  $W_H^* = W_T \cdot K_H^*$ , мм/мин. Для сверления отверстий диаметром 8 мм с различным сочетанием обрабатываемых материалов и материалов инструментов было рассчитано оптимальную стойкость соответствующую максимальной интенсивности формообразования. На рис. 3 показан графики зависимости оптимальной стойкости и нормативной интенсивности формообразования от параметра  $b$ .

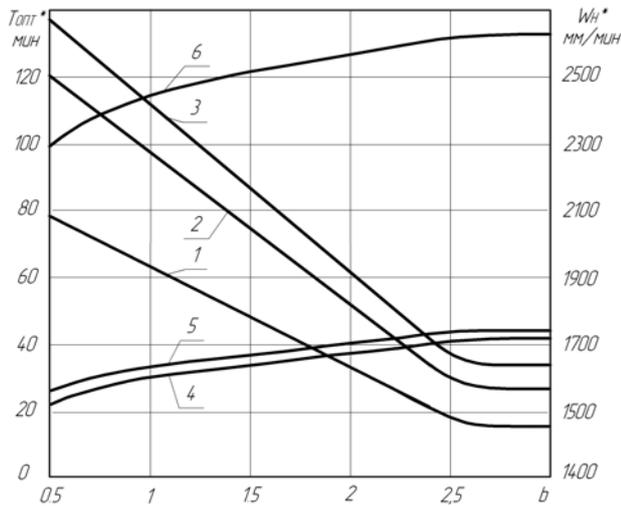


Рис. 3. Зависимость оптимальной стойкости  $T_{ОПТ}^*$  комплекта инструментов и нормативной интенсивности формообразования  $W_H^*$  от параметра  $b$ : 1 -  $T_{ОПТ}^*$ , серый чугун (СЧ), ВК8; 2 -  $T_{ОПТ}^*$ , сталь конструкционная (СК), Р6М5; 3 -  $T_{ОПТ}^*$ , алюминий (АЛ), Р6М5; 4 -  $W_H^*$ , СЧ, ВК8; 5 -  $W_H^*$ , СК, Р6М5; 6 -  $W_H^*$ , АЛ,

стойкости и нормативной интенсивности формообразования от параметра  $b$ .

С увеличением надежности режущего инструмента оптимальная стойкость, обеспечивающая максимальную интенсивность формообразования, снижается, а режимы резания увеличиваются, обеспечивая увеличение интенсивности формообразования. Вместе с тем снижаются затраты времени на замену инструментов, что также приводит к росту интенсивности формообразования. При нормальном законе распределения,  $b$  близко к 3, зависимость надежности инструмента на оптимальную стойкость и интенсивность формообразования практически исчезает в связи с тем, что инструменты стойкость которых подчиняется нормальному закону распределения имеют высокую надежность и заменяются планово с минимальными затратами времени.

На основании полученных оптимальных значений периодов стойкости рассчитаны скорости резания и частоты вращения инструментов уровни которых значительно превышают рекомендуемые нормативами [1], рис. 4.

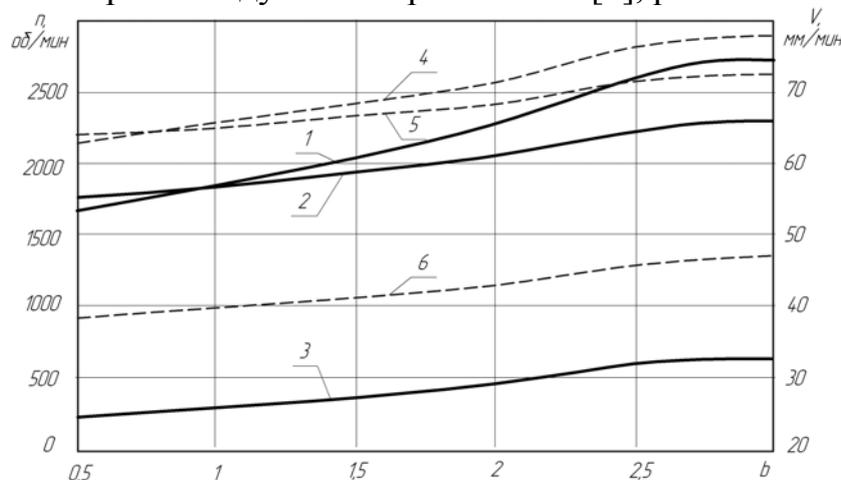


Рис. 4. Графики зависимости частоты вращения  $n$  и скорости резания  $V$  инструментов от параметра  $b$  при сверлении отверстий диаметром 8 мм: 1 -  $V$ , СЧ, ВК8,  $N_K=20$ ; 2 -  $V$ , АЛ, Р6М5,  $N_K=20$ ; 3 -  $V$ , СК, ВР6М5,  $N_K=30$ ; 4 -  $n$ , СЧ, ВК8,  $N_K=20$ ; 5 -  $n$ , АЛ, Р6М5,  $N_K=20$ ; 6 -  $n$ , СК, Р6М5,  $N_K=30$ .

Так, например, при обработке чугуна СЧ 20 сверлами ВК8 диаметром 8 мм рекомендуемая нормативами скорость резания должна составлять 27 м/мин, а частота вращения 1070 об/мин, что соответствует  $W_H=1412$  мм/мин. По предлагаемой методике скорость резания и частота вращения должны составлять при  $b=1$   $V=58$  м/мин,  $n=2300$  об/мин, что соответствует  $W_H=1638$  мм/мин, при  $b=2$   $V=67$  м/мин,  $n=2670$  об/мин,  $W_H=1679$  мм/мин, при  $b=3$   $V=77$  м/мин,  $n=3060$  об/мин,  $W_H=1721$  мм/мин. Таким образом предложенная методика определения режимов резания позволяет повысить режимы резания в 2 – 2,8 раза в зависимости от надежности режущего инструмента, что повышает производительность обработки на 16 – 21 %.

Обобщая полученные результаты можно отметить, что предложенная методика выбора скоростей резания на МС позволяет рассчитывать режимы резания, обеспечивающие высокопроизводительную обработку и реализацию потенциальных возможностей современного оборудования, учитывая конструктивно-технологические особенности обрабатываемых деталей и влияние вероятностного характера стойкостных зависимостей инструмента.

**Литература:** 1. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. Часть II. Нормативы режимов резания. – М.: Экономика, 1990. – 478 с. 2. Карпусь В. Е. Интенсивность формообразования технологических систем // Вестник машиностроения. - 2000. - №2. - С. 30-34. 3. Груничев А. С., Михайлов А. И., Шор Я. Б. Таблицы для расчетов надежности при распределении Вейбулла. Издательство стандартов, 1974. – 64 с.

**УДК 621.923**

## **ОСОБЕННОСТИ КОМПОНОВКИ УСТАНОВКИ ДЛЯ КАВИТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СОЖ**

**Фесенко А.В.**, канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)

*The installation for kavitacion of processing Greasing and Cooling liquids of liquids is packed by a modular principle, that allows to choose an optimum combination of elements ensuring required quality emulsija*

Бурное развитие современных производств ставит перед наукой задачи по поиску эффективных энергосберегающих технологий, созданию рациональных конструкций аппаратного обеспечения и оптимизации режимов их работы. Одним из перспективных направлений является использование кавитации в технологических процессах приготовления смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) для металлорежущего, прокатного и прессового оборудования, для получения специальных эмульсий при термообработке деталей.

Кавитационное воздействие на среду позволяет интенсифицировать многие технологические процессы, протекающие в жидких средах. Гидродинамическая кавитация эффективно используется для процессов эмульгирования, гомогенизации, сверхтонкого перемешивания [1]. Использование этого процесса для приготовления СОЖ дает возможность получения гомогенных мелкодисперсных эмульсий нужного состава с минимальной трудоемкостью. Такие эмульсии обладают высокими эксплуатационными свойствами [2]. Это обуславливается эффективной технологией приготовления СОЖ и рациональными аппаратными средствами.

Анализируя способы сообщения энергии потоку технологических жидкостей при активации обрабатываемой среды можно выделить две схемы работы устройств:

пассивные, когда энергия потоку сообщается до входа в аппарат, и активные, создающие потоки в самом устройстве.

К пассивным следует отнести устройства статического типа, не содержащие подвижных частей в системах формирования потоков жидкости. Механическая активация эмульсии в этих агрегатах происходит в результате взаимодействия движущейся жидкости с неподвижными элементами рабочей камеры, выполненными и расположенными таким образом, чтобы наиболее эффективно формировать поток с резко выраженной нелинейностью пространственного распределения мгновенных скоростей жидкости, как по величине, так и по направлению. Для этого используются лабиринты, отверстия, узкие щели в специальных головках и др. При этом, чем выше требования к дисперсности и гомогенности эмульсии тем большим запасом энергии должен обладать поток перед кавитатором. Такие схемы должны включать в себя внешние нагнетающие устройства, обеспечивающие высокие скорости обрабатываемой среде.

К активным могут быть отнесены устройства динамического типа, в которых механическая активация происходит в результате воздействия на жидкость подвижных элементов – вращающихся, колеблющихся или совершающих более сложные движения. В роторных устройствах используется энергия, которую получают эмульсии в самом аппарате за счет центробежных сил, возникающих во вращающихся полостях рабочих колес (роторов). К таким устройствам относятся роторно-пульсационные аппараты, различные дезинтеграторы и т.д. Отдельно следует выделить группу роторно-кавитационных диспергаторов, где энергия потоку сообщается в закрытых радиальных каналах ротора. В этом случае, при прочих равных условиях, интенсивность обработки определяется как геометрическими параметрами каналов ротора, так и частотой его вращения. Такие аппараты могут выполнять и функции перекачивающих насосов, что, как правило, уменьшает энергоемкость всей установки.

Целесообразно применять методы, обеспечивающие получение требуемой дисперсности и гомогенности в потоке за один проход жидкости через установку. В этом случае в зависимости от технологических требований к конечному продукту установка может включать в себя и активные, и пассивные элементы в различных сочетаниях.

На рис. 1 показана схема установки для получения и восстановления СОЖ. При этом используются несколько модулей, обеспечивающих смешение, гомогенизацию и кавитационную обработку эмульсии.

На входе диспергатора установлен пассивный смеситель, обеспечивающий предварительное перемешивание добавок с целью равномерного распределения их в потоке. Смеситель выполнен в виде отдельного блока, конструкция которого изменяется в зависимости от количества вводимых добавок и их процентного содержания. Присоединительные размеры этих узлов одинаковы, что позволяет быстро осуществлять их замену.

Основным модулем, обеспечивающим энергией потоки жидкой среды в установке является роторный диспергатор центробежного типа [3]. Он имеет две рабочие камеры. В зависимости от вида эмульсии и технологических требований к ее получению в рабочих камерах могут устанавливаться различные элементы. Так, например, в первой камере может быть установлена роторно-пульсационная группа, обеспечивающая получение гомогенной эмульсии при обработке вязких составляющих, или вертушка с открытыми лопастями и периферийными прерывателями потока для водных СОЖ.

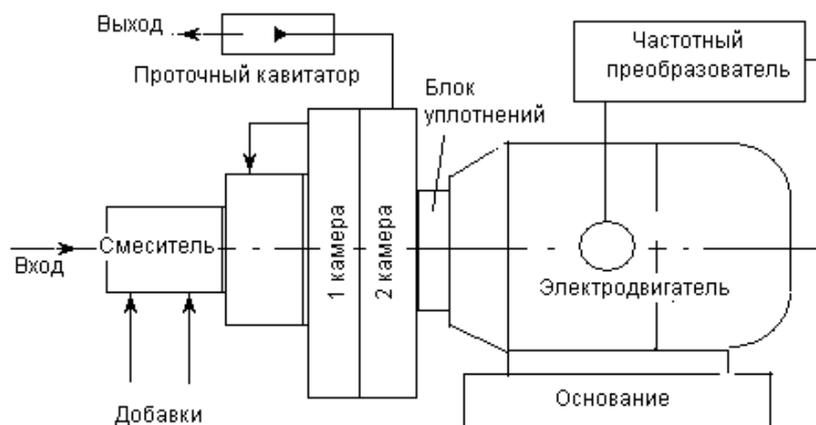


Рис.1. Установка для получения СОЖ.

Вторая рабочая камера предназначена для выполнения кавитационной обработки в специальных каналах ротора и на периферийном прерывателе. При этом могут использоваться различные конструкции роторов и прерывателей.

Для интенсификации процессов в установке каждая камера имеет канал рециркуляции. Кроме того предусмотрена рециркуляция с выхода второй камеры на вход первой. Все это позволяет увеличить интенсивность механоактивации эмульсии, а также нагрев ее за счет увеличения времени пребывания в рабочей зоне, как отдельной камеры, так и в установке в целом.

В зависимости от свойств обрабатываемой среды в установке могут устанавливаться два вида уплотнений. Габаритные и присоединительные размеры этих модулей унифицированы. В обычных условиях при обработке водных и масляных СОЖ при температурах до 60-80°C для изоляции рабочей зоны используется блок с армированными манжетами из МБР и промежуточной дренажной полостью.

Второй вид уплотнения используется при обработке агрессивных сред при высокой температуре и включает в себя торцевое уплотнение (ТУ), промежуточную емкость с маслом и манжету. Использование карбида вольфрама и меди в контактных парах торцевого уплотнения позволяет значительно повысить его стойкость, и сделать соизмеримой с долговечностью подшипников электродвигателя. Использование дополнительной полости с маслом позволяет обеспечивать смазку ТУ и отвод тепла из зоны трения.

Диспергатор установлен на фланцевом электродвигателе. Скорости вращения рабочих роторов в первой и второй камерах одинаковы и определяются частотой вращения вала электродвигателя. Использование частотного преобразователя позволяет работать в диапазоне от 1000 до 4000 об/мин.

При необходимости, обусловленной технологическими особенностями получения СОЖ, на выходе диспергатора устанавливается пассивный проточный кавитатор. Предусмотрены 4 варианта конструкций кавитаторов: щелевой, лабиринтный, лабиринтный с постоянными магнитами и с конусным рассекателем.

Такой модульный принцип компоновки установки для механоактивации жидких сред, в частности СОЖ, позволяет гибко реагировать на изменение состава и требования к получаемым эмульсиям.

В некоторых литературных источниках и проспектах авторы предлагают различные универсальные аппараты, гарантируя положительный эффект для любых эмульсий и смесей. Очень часто такой подход дает отрицательный результат, что тор-

мозит дальнейшее использование механоактивации на производстве.

Мы считаем, что при разработке технологических процессов с использованием кавитационных процессов необходимо проведение предварительного исследования гидродинамики потока и результатов его воздействия на получаемый продукт.

Для проведения гидродинамических испытаний установки нами разработана автоматизированная система контроля (рис. 2), позволяющая получить необходимые данные на отдельных модулях. При этом контролируется давление (разряжение) и температура эмульсии на входе в установку (МВ, Т1), между первой и второй рабочими камерами (Р2, Т2), на выходе из диспергатора (Р3, Т3) и после проточного кавитатора (Р4, Т4). Производительность установки определяется по расходомеру (РМ). Кроме этого, выполняется контроль частоты вращения по датчику оборотов и нагрузки по ваттметру, установленному в электрической цепи двигателя.

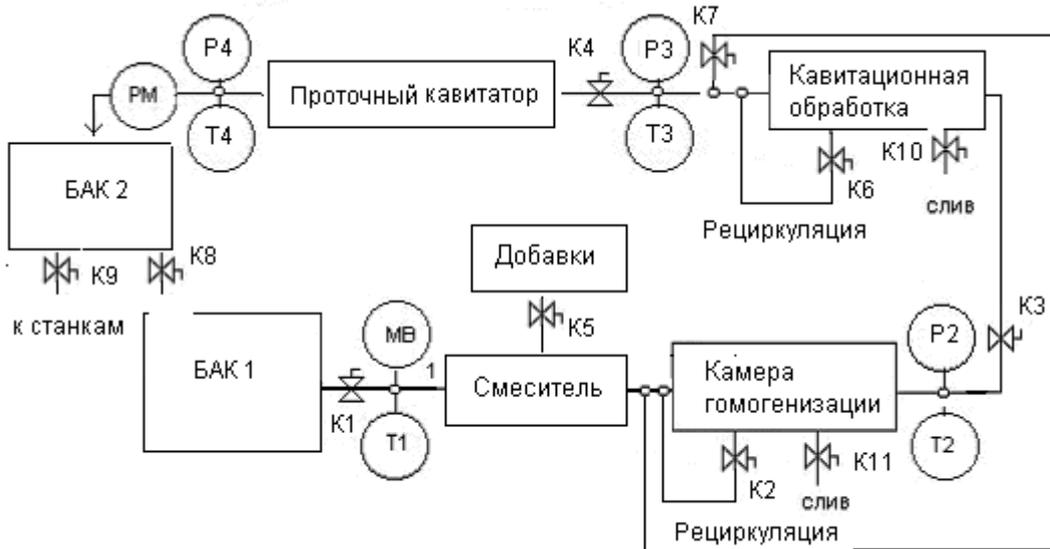


Рис. 2. Схема гидродинамических испытаний установки для получения СОЖ.

Методика проведения испытаний включала в себя определение гидродинамических параметров, как отдельных блоков, так и установки в целом. При этом информация от датчиков поступала в компьютер. Эти данные формировались в таблицы с заданной дискретностью, что позволяло выполнить анализ влияния параметров отдельных блоков на работу установки в целом.

Далее приведен пример анализа результатов гидродинамических испытаний первой камеры на воде при частоте вращения вала электродвигателя 2950 об/мин.

При установке в первой камере вертушки с наклонными лопастями максимальное давление при перекрытом кране К3 составляло  $P_{2max} = 0,22$  МПа. Максимальная производительность первой камеры (при открытых кранах К1 и К3) составляла  $Q = 4,5$  м<sup>3</sup>/час при разрежении на входе до  $-0,07$  МПа и давлении на выходе

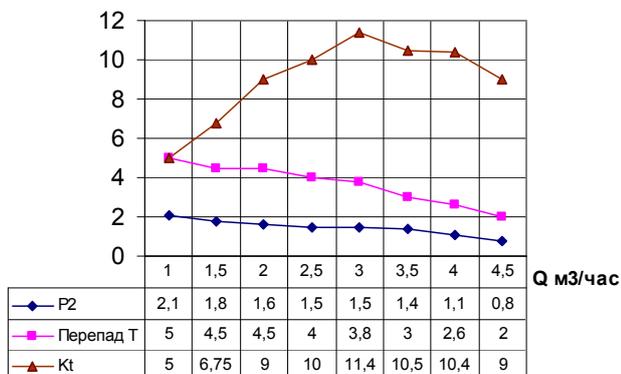


Рис. 3. Взаимосвязь гидродинамических параметров.

$P_2 = 0,08$  МПа.

Изменение параметров потока жидкости выполнялось при изменении проходных сечений на входе (кран К1) и на выходе (кран К2). При этом разность температур на входе и выходе в первой камере  $\Delta T_1 = T_2 - T_1$  зависела от расход и составляла от 2 до 5°C. Для косвенной оценки интенсивности гидродинамических процессов в модуле нами использовался коэффициент интенсивности нагрева, определяемый по производительности и перепаду температур  $K_t = Q \cdot \Delta T_1$  (м<sup>3</sup> град/час).

На рис. 3, как пример, показан график взаимосвязи гидродинамических параметров, характеризующих работу первой камеры. Из графиков видно, что наиболее эффективная работа первой камеры будет при производительности 3 м<sup>3</sup>/час. Далее выполнялся анализ гомогенности и дисперсности эмульсии на этих режимах. На основании этого анализа вносились данные в матрицу возможных компоновок. Аналогичным образом выполнялась проверка остальных блоков установки. Располагая данными по каждому модулю в отдельности, и выполнив оценку их взаимовлияния при обработке различных видов эмульсии можно определить оптимальную общую компоновку установки для конкретных условий эксплуатации.

**Литература:** 1. Федаткин И.М., Немчин А. Ф. Использование кавитации в технологических процессах. - К.: Вища школа, Изд-во при Киевском ун-те. 1984. - 68 с. 2. Кавитационный роторный диспергатор. – <http://www.energy-saving-technology.com/page-ru/tgm-rotor-k/t-tgm-rotor-ru.html>. 3. Роторно-пульсационный аппарат. Патент на корисну модель №2005 09950,. Фесенко А.В., Пличко В.С., Кузнецов П.Б., Луцкий С.В., Реймол Л.

**УДК 621.923**

## **ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ БЕЗВОЛЬФРАМОВЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ**

**Краснощек Ю.С.**, канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)

*The estimation of a roughness of a surface without tungstic firm alloys after diamond grinding is made.*

Алмазно-искровое шлифование (АИШ) является высокоэффективным методом обработки труднообрабатываемых материалов. В процессе АИШ в зону резания вводится дополнительная энергия, за счет чего образуются эрозионные разряды. Это приводит к удалению частиц, засаливающих круг, и самозатачиванию режущей поверхности круга за счет постепенного удаления металлической связки и вступления в работу новых зерен. Так обеспечивается выступание зерен на определенном уровне над связкой и отсутствие контакта связки с обрабатываемым материалом, из-за чего высокая производительность процесса шлифования сохраняется длительное время [1].

Необходимо отметить, что эрозионные разряды в зоне обработки воздействуют и на обрабатываемую поверхность, что может вызывать появление лунок (осповидных углублений). Такое воздействие на обрабатываемую поверхность может приводить к изменению физико-механических свойств и увеличению шероховатости. В этой связи представляет интерес анализа качества поверхностного слоя различных материалов после АИШ и в частности формирования шероховатости, которая является важнейшим показателем качества обработанной поверхности.

В работе приведены результаты исследования шероховатости обработанной поверхности в условиях АИШ твердых сплавов чашечными кругами. Кроме того, изучение шероховатости обработанной поверхности твердых сплавов проводилась также для сравнения в условиях алмазного шлифования кругами на бакелитовых связках.

Влияние условий шлифования на шероховатость обработанной поверхности чашечными алмазными кругами изучалось для труднообрабатываемых безвольфрамовых твердых сплавов КНТ-16, ТН-20 в сравнении с вольфрамо-содержащими твердыми сплавами Т15К6. Установлено, что для различных твердых сплавов уровень параметра шероховатости  $Ra$  различен – наименьший для КНТ-16 и наибольший для Т15К6 независимо от вида шлифования (табл. 1,2,3,4). Это связано с худшей внедряемостью алмазных зерен в сплав КНТ-16 по сравнению со сплавами ТН-20 и Т15К6. Подобное явление можно обеспечить значительным притуплением алмазных зерен круга при обработке безвольфрамовых твердых сплавов, что приводит к уменьшению шероховатости обработанной поверхности.

Подтверждением вышеизложенного послужило электронно-микроскопическое исследование шлифованных в одинаковых условиях поверхностей сплавов ТН-20 и КНТ-16. На поверхности сплава ТН-20 видны следы алмазных зерен и субмикроромок зерен, что является свидетельством высокой развитости режущей поверхности кругов.

В то же время поверхность сплава КНТ-16 не имеет четко выраженных следов обработки субмикроромками алмазных зерен. Отдельные микронеровности являются результатом пластического течения на поверхности сплава КНТ-16. Его появление связано с наличием высоких контактных температур, приводящих, с одной стороны, к затуплению субмикроромок, а с другой к разогреву обрабатываемой поверхности.

Твердые сплавы, обработанные в условиях АИШ, имеют большую шероховатость по сравнению с алмазным шлифованием. Такая закономерность связана с большой развитостью режущей поверхности кругов, работающих с введением дополнительной энергии в зону резания. Следует учитывать также, что алмазы марки АС4, применяемые в кругах на бакелитовой связке, имеют более развитый субмикрорельеф в сравнении с прочными алмазами марки АС6. Кроме того, бакелитовая связка оказывает большие сглаживающие действия на обрабатываемую поверхность по сравнению с металлической связкой.

Рассмотрим влияние условий шлифования на параметр шероховатости  $Ra$ . Увеличение поперечной подачи сначала вызывает некоторое снижение шероховатости, а затем повышение ее. Возрастание шероховатости при больших значениях поперечных подач обусловлена возрастанием глубины внедрения зерен в обрабатываемый материал. Это особенно хорошо наблюдается при АИШ, когда введение дополнительной энергии в зону резания способствует развитости режущей поверхности кругов. При минимальных значениях поперечной подачи происходит увеличение шероховатости за счет рисков, получаемых от отдельно выступающих зерен.

Скорость резания также влияет на микрогеометрию обработанной поверхности. Уменьшение шероховатости с увеличением скорости происходит главным образом за счет снижения сечения срезов каждым работающим зерном.

Таблица 1

Влияние поперечной подачи на параметр шероховатости  $Ra$ , мкм

Вид шлифования	Сплав	Поперечная подача, мм/дв. х.											
		0,005	0,01	0,015	0,020	0,025	0,03	0,04	0,06	0,008	0,10	0,12	0,15
АИШ, круг	Т15К6	-	0,40	-	0,32	-	0,30	0,30	0,32	0,37	0,32	0,48	0,58
12А2-45°АС6 100/80;	ТН-20	-	0,34	-	0,30	-	0,27	0,27	0,30	0,35	0,30	0,45	-
МВ1-100; V=25 м/с	КНТ-16	-	0,25	-	0,26	-	0,25	0,25	0,28	0,32	0,36	-	-
Алмазное, круг 12А2-45°АС4	ТН-20	0,27	0,25	0,25	0,25	0,26	0,28	-	-	-	-	-	-
100/80 Б1-100; V=25 м/с	КНТ-16	0,24	0,22	0,22	0,22	0,22	0,24	-	-	-	-	-	-

Таблица 2

Влияние скорости резания на параметр шероховатости  $Ra$ , мкм

Вид шлифования	Сплав	Скорость резания, м/с							
		15	20	25	30	35	40	45	
АИШ, круг 12А2	Т15К6	0,45	0,35	0,30	0,29	0,28	0,27	0,26	
АС6 100/80 МН-100;	ТН-20	0,40	0,32	0,27	0,25	0,25	0,25	0,24	
$S_{non} = 0,03$ мм/дв. х.	КНТ-16	0,33	0,28	0,25	0,23	0,21	0,20	0,20	
Алмазное, круг 12А2-45°АС4	ТН-20	0,28	0,26	0,25	0,23	0,21	0,20	-	
100/80 Б1-100; $S_{non} = 0,01$ мм/дв. х.	КНТ-16	0,23	0,23	0,22	0,21	0,21	0,20	-	

Таблица 3

Влияние зернистости кругов на параметр шероховатости  $Ra$ , мкм

Вид шлифования	Сплав	Зернистость круга, мкм			
		50/40	100/80	160/125	200/160
АИШ, круг А12А2-45° АС6 МВ1-100; V=25 м/с, $S_{non} = 0,03$ мм/дв. х.	Т15К6	0,26	0,30	0,32	0,87
	ТН-20	0,25	0,27	0,46	0,78
	КНТ-16	0,24	0,25	0,40	0,67
Алмазное, круг А12А2-45° АС4 100/80 Б1-100; V=25 м/с, $S_{non} = 0,01$ мм/дв. х.	ТН-20	0,22	0,25	0,44	0,72
	КНТ-16	0,20	0,22	0,36	0,6

Таблица 4

Влияние концентрации кругов на параметр шероховатости  $Ra$ , мкм

Вид шлифования	Сплав	Концентрация алмазов, %			
		50	100	150	200
АИШ, круг А12А2-45° АС6 100/80 МВ1; V=25 м/с, $S_{non} = 0,03$ мм/дв. х.	Т15К6	0,28	0,30	0,35	0,44
	ТН-20	0,26	0,27	0,31	0,38
	КНТ-16	0,24	0,25	0,27	0,33
Алмазное, круг А12А2-45° АС4 100/80 Б1; V=25 м/с, $S_{non} = 0,01$ мм/дв. х.	ТН-20	0,33	0,25	0,24	0,23

Зернистость алмазных кругов наиболее существенно влияет на шероховатость обработанной поверхности. Увеличение зернистости круга приводит к уменьшению числа работающих зерен и значительному возрастанию их разновысотности. При этом увеличивается сечение единичных срезов, приводящие к росту шероховатости, кроме того крупные зерна оставляют более глубокие борозды в обрабатываемом материале.

Концентрация алмазов в круге по-разному влияет на шероховатость обрабатываемой поверхности. В условиях АИШ увеличение концентрации в значительной мере повышает развитость режущей поверхности кругов. При этом возрастает разновысотность алмазных зерен в круге, что приводит к увеличению шероховатости обрабатываемой поверхности.

При алмазном шлифовании кругами на бакелитовой связке увеличение концентрации алмазов приводит к уменьшению шероховатости. Такая тенденция вызвана уменьшением сечения единичных срезов из-за увеличения количества работающих зерен. Развитый субмикрорельеф зерен марки АС4 также способствует получению более низкой шероховатости.

Следует отметить также, что в указанных выше диапазонах условий шлифования трещинообразование на обработанных поверхностях твердых сплавов не наблюдалось. Трещинообразование контролировалось методом цветной дефектоскопии [2] с помощью люминисцентной жидкости ЛТ-12 [3], в качестве проявляющегося состава применялся проявитель БР-5 [4]. Кроме того трещинообразование контролировалось с помощью сканирующего микроскопа «Jeol – JSM - 50».

Таким образом, АИШ твердых сплавов является высокоэффективным способом обработки безвольфрамовых твердых сплавов, обеспечивающим высокий класс шероховатости поверхностей.

**Литература:** 1. Беззубенко Н.К., Сизый Ю.А., Троянов Ю.М. Режущая способность кругов при алмазно-эрозионном шлифовании. – В кн.: Резание и инструмент. – Харьков: Вища школа, 1979, вып. 22. – С. 114...119. 2. Карякин А.В., Боровиков А.Ф. Люминисцентная и цветная дефектоскопия. – М.: Машиностроение, 1972. – 240 с. 3. Авторск. свид. 362860 (СССР). Люминисцентная жидкость для дефектоскопии. Л.Я. Малкес, Н.В. Кузьмина и др. Оpubл. в Б.И., 1973, № 3. с. 54. 4. Авторск. свид. 530233 (СССР). Проявитель для капиллярной дефектоскопии. Л.Я. Малкес, Л.И. Сукиасова и др. Оpubл. в Б.И., 1976, № 36. с. 97.

**УДК 539.61:669**

## **ТРЕБОВАНИЯ К ФАЗОВОМУ СОСТАВУ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ**

**Мацевитый В.М.**, докт. техн. наук, **Казак И.Б.**, канд. техн. наук,  
**Вакуленко К.В.** (г. Харьков, Украина)

*By example of certain refractory interstitial phases it is shown that the bonding adhesion activity depends essentially on the ratio of metal and nonmetal in the phase. This fact must be taken into account when developing protective coatings for cutting tools*

Использование режущих инструментов из твердых сплавов и быстрорежущих сталей с защитными покрытиями во всем мире становится скорее нормой, чем исключением, что объясняется существенно более высоким уровнем работоспособности таких инструментов по сравнению с инструментом без покрытий. Наибольшее применение нашли многослойные покрытия на основе TiC, TiN, TiCN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и дру-

гих тугоплавких соединений.

Анализ влияния покрытий на процесс резания [1] позволил установить, что основным функциональным свойством покрытия, обеспечивающим его эффективность, является низкий уровень адгезионной активности внешней стороны покрытия по отношению к обрабатываемому материалу. Такие покрытия обеспечивают снижение схватываемости инструмента с обрабатываемым материалом, снижение силы резания, уменьшение интенсивности адгезионного и диффузионного изнашивания инструментов.

Давно было замечено, что покрытия различного фазового состава существенно отличаются по своей эффективности, при этом наибольшая эффективность не всегда характерна для покрытий с высокой твердостью.

В работах [2 - 5] на основе анализа справочных данных по смачиваемости большого количества тугоплавких соединений жидкими металлами нами было показано, что адгезионная активность тугоплавких соединений существенно зависит от их электронной структуры. В частности, было установлено, что с увеличением разности электроотрицательности элементов, входящих в двухкомпонентное тугоплавкое соединение (т.е. с ростом ионной компоненты связи) адгезионная его активность уменьшается. Именно поэтому нитриды *d*-переходных металлов IV группы при высоких температурах имеют существенно меньшую адгезионную активность по сравнению с карбидами этих металлов. Было также замечено, что смачиваемость жидкими металлами тугоплавких соединений, представляющих собой фазы внедрения, существенно зависит от соотношения между количеством металла и неметалла в этих фазах. Так, например, при смачивании жидкой медью соединений TiC и ZrC краевой угол смачивания  $\theta$  существенно уменьшается (смачиваемость и адгезионная активность соединений увеличивается) с уменьшением количества углерода в этих фазах (табл.1)

Таблица 1

Влияние содержания углерода в соединениях TiC и ZrC на их смачиваемость медью при температуре 1100 °C в вакууме [6]

Состав фазы	Краевой угол $\theta$ , °
TiC <sub>0,99</sub>	~ 105
TiC <sub>0,88</sub>	~ 100
TiC <sub>0,75</sub>	~ 90
TiC <sub>0,6</sub>	~ 50
ZrC <sub>1,0</sub>	~ 140
ZrC <sub>0,88</sub>	~ 115
ZrC <sub>0,72</sub>	~ 80
ZrC <sub>0,6</sub>	~ 40

Таблица 2

Влияние содержания углерода в соединениях NbC и TaC на их смачиваемость медью при температуре 1100 °C в вакууме [6]

Состав фазы	Краевой угол $\theta$ , °
NbC <sub>1,0</sub>	~ 40
NbC <sub>0,82</sub>	~ 85
NbC <sub>0,75</sub>	~ 90
NbC <sub>0,66</sub>	~ 70
TaC <sub>1,0</sub>	~ 60
TaC <sub>0,9</sub>	~ 80
TaC <sub>0,78</sub>	~ 100

Для соединений NbC и TaC, которые также являются фазами внедрения, напротив, характерно снижение адгезионной активности с уменьшением (до определенного уровня) содержания углерода (табл. 2). При этом следует отметить, что минимальная адгезионная активность соответствует такому содержанию углерода в рассматриваемых фазах внедрения, которое обеспечивает наивысшую температуру

плавления соединения.

Приведенные факты свидетельствуют о существенной зависимости адгезионной активности соединений не только от фазового состава, но и от химического состава конкретной фазы, что, безусловно, должно учитываться при разработке технологии покрытий для режущих инструментов.

При получении покрытий TiN на вакуумно-плазменных установках типа «Булат» необходимо иметь ввиду, что без специальных мер «борьбы» с капельной фазой, состоящей главным образом из  $\alpha$ -Ti, покрытия получаются двухфазными ( $\alpha$ -Ti+TiN), что, безусловно, усиливает адгезионную активность покрытия, тем более, что капельная фаза в результате схода стружки по поверхности инструмента «размазывается» по всей площадке контакта. Поэтому для получения высокоэффективного покрытия с низкой адгезионной активностью к обрабатываемому материалу необходимо обеспечить отсутствие  $\alpha$ -Ti на его внешней поверхности. Сам же нитрид титана, как показывают наши исследования, должен иметь стехиометрический состав TiN. Следует отметить, что присутствие капельной фазы в покрытии TiN не только повышает адгезионную активность покрытия, но и обеспечивает облегчение пути для диффузии атомов обрабатываемого и инструментального материалов через покрытие, что ухудшает способность покрытия предотвращать диффузионный износ при эксплуатации твердосплавных инструментов. Эти обстоятельства, которые, к сожалению, часто не учитываются при нанесении покрытий TiN, снижают эффективность покрытий при резании.

**Литература:** 1. Мацевитый В.М. Покрытия для режущих инструментов. – Харьков: Вища шк., 1987. – 128 с. 2. Мацевитый В.М., Казак И.Б., Вакуленко К.В. О важности ионной составляющей межатомной связи в обеспечении низко адгезионной активности инструментальных материалов и покрытий для режущих инструментов при высоких температурах резания // Проблемы машиностроения. – 2005, №2(8). – С. 87-90. 3. Вакуленко К.В., Мацевитый В.М., Казак И.Б. Критерии прогнозирования адгезионной активности износостойких покрытий различного химического состава на режущих инструментах. // Вісник національного технічного університету сільського господарства. – 2005, вип.33. – С. 149-152. 4. Мацевитый В.М., Казак И.Б., Вакуленко К.В. Электронная структура карбидов, нитридов и оксидов  $d$ -переходных металлов IV – VI групп и их адгезионная активность. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2006, № 1/2 (19). – С. 85-89. 5. Мацевитый В.М., Казак И.Б., Вакуленко К.В. О природе низкой адгезионной активности тугоплавких нитридов и оксидов  $d$ -переходных металлов. // Сб. докладов 7-й Междунар. конф. ОТТОМ-7 «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов». – Харьков, 2006, т. 3. – С. 36-39. 6. Самсонов Г.В., Винницкий И.М. Тугоплавкие соединения. – М.: Металлургия, 1976. – 560 с.

**УДК 621.923**

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОКОНЧАТЕЛЬНОГО ШЛИФОВАНИЯ  
ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИВОДОВ ШАХТНЫХ КОНВЕЙЕРОВ И  
ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ИХ  
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

**Ковальчук А.Н.** (г. Харьков, Украина)

*The general characteristic of the developed effective technological process of final grinding of responsible details of drives of mine conveyors and tools from the firm alloys used for their machining is given.*

Обработка материалов резанием по-прежнему остается основным методом формообразования поверхностей деталей машин и в ближайшее время не утратит

своей значимости. Поэтому задачи, связанные с повышением ее эффективности, являются чрезвычайно важными и актуальными, направленными на создание конкурентноспособной отечественной машиностроительной продукции. В успешном решении этих задач большое значение имеет совершенствование методов финишной обработки и в особенности окончательного шлифования деталей машин, поскольку на машиностроительных предприятиях, как правило, параметры точности и качества обработки формируются на операциях шлифования. Наглядным примером тому является производство ответственных деталей приводов шахтных конвейеров (планетарных редукторов мощностью более 200 кВт), изготавливаемых на Харьковском машиностроительном заводе “Свет шахтера”, являющимся одним из основных производителей шахтного оборудования в Украине и странах СНГ. Это валы, вал–шестерни, колеса, муфты, водила, зубчатые венцы, приводные звездочки и т.д. Данные детали габаритны по размерам, изготавливаются из низкоуглеродистых легированных сталей, после предварительной лезвийной обработки подвергаются цементации и закалке (токами высокой частоты) до высокой твердости HRC 62–65, затем шлифуются.

При работе в шахтных условиях данные детали испытывают большие механические нагрузки, поэтому к ним предъявляются достаточно высокие требования по точности и качеству обработки, в особенности по точности размера обрабатываемых поверхностей. Например, при обработке цилиндрических поверхностей ступенчатых валов диаметром до 200 мм и более точность размера составляет 0,002–0,008 мм.

Обеспечение высоких показателей точности и качества обработки требует установления достаточно больших припусков (до 1 мм на сторону), что приводит к существенному увеличению продолжительности операций шлифования. Так, длительность врезного шлифования одной ступени вала диаметром 200 мм при съеме припуска до 1 мм на сторону составляет свыше 5 минут. Высокая длительность обработки обусловлена также необходимостью постоянного контроля рабочим-шлифовщиком размера обрабатываемой поверхности на круглошлифовальном станке с “ручным” управлением.

Повысить эффективность обработки деталей приводов шахтных конвейеров можно за счет применения более совершенного оборудования, инструментов и технологических процессов, разработанных на основе новых методологических подходов научно-обоснованного выбора оптимальных маршрутов и параметров операций. Очевидно, целесообразно операции шлифования выполнять на шлифовальных станках с ЧПУ, что позволит повысить производительность обработки при обеспечении требований по точности обрабатываемых поверхностей.

С целью уменьшения припусков, оставляемых под операции окончательного шлифования, необходимо на предварительных операциях механической обработки использовать более эффективные конструкции твердосплавных режущих лезвийных инструментов (резцов, фрез, зенкеров, разверток и т.д. с напайными твердосплавными пластинками), обладающие повышенной режущей способностью и обеспечивающие более высокое качество обработки. Для этого важно обработку (шлифование и заточку) твердосплавных инструментов осуществлять с применением алмазных кругов, позволяющих уменьшить силовую и тепловую напряженность процесса и таким образом повысить точность и качество обрабатываемых поверхностей ре-

жущих инструментов. Вместе с тем, в настоящее время на заводе шлифование и заточка большого количества разнообразных по конструктивному исполнению дорогостоящих твердосплавных инструментов производится обычными абразивными кругами. Применение алмазных кругов в условиях массового изготовления твердосплавных инструментов при съеме больших припусков (до 2-х мм на сторону) труднообрабатываемых твердых сплавов оказалось неэффективно в связи с более высокой себестоимостью и низкой производительностью обработки по сравнению с шлифованием обычными абразивными кругами.

Стремление форсировать съем больших припусков твердого сплава при обычном абразивном шлифовании приводит к повышению силовой и тепловой напряженности процессов шлифования и заточки, появлению различного рода дефектов на обработанных поверхностях инструмента, что недопустимо. Наиболее перспективным направлением перехода на полную алмазную обработку (без применения шлифовальных кругов из обычных абразивов) является использование алмазных кругов на металлических связках. При этом эффективно применение прогрессивных методов шлифования алмазными кругами на металлических связках с введением в зону резания или автономно дополнительной электрической энергии (алмазно-искровое шлифование и электроэрозионная правка алмазных кругов на металлических связках, автономная непрерывная электрохимическая правка алмазных кругов и т.д.). Данные методы обеспечивают непрерывное поддержание в процессе обработки высокой режущей способности алмазного круга. Однако, их применение в условиях съема больших припусков твердых сплавов при одновременном обеспечении высоких требований по точности и качеству обработки твердосплавных инструментов не всегда эффективно и требует оптимизации условий шлифования – в первую очередь оптимизации структуры и параметров процесса съема припуска (т.е. по сути оптимизации законов съема припуска). К сожалению, данному вопросу, в отличие от традиционных вопросов оптимизации режимов резания, в научно-технической литературе уделено мало внимания, не выявлены резервы обработки. Здесь речь идет об установлении на основе разработанных математических моделей оптимальных законов съема припуска (по его толщине) с точки зрения обеспечения максимально возможной производительности обработки с учетом ограничений по точности и качеству обрабатываемых (плоских, цилиндрических и других) поверхностей. Это позволит определить оптимальные маршруты обработки, необходимое количество операций и переходов, а также другие параметры, реализующие оптимальные законы съема припуска при механической обработке.

Вопросы оптимизации структуры и параметров процесса съема припуска чрезвычайно актуальны как для совершенствования операций шлифования твердосплавных инструментов, так и совершенствования операций окончательного абразивного шлифования деталей приводов шахтных конвейеров. Исходя из этого, в работе решена задача создания и внедрения эффективных технологий финишной обработки ответственных деталей приводов шахтных конвейеров и твердосплавных инструментов, используемых для их механической обработки. Она основана на оптимизации структуры и параметров процесса съема припуска на операциях окончательного шлифования по критерию основного времени обработки с учетом ограничений по точности и качеству обрабатываемых поверхностей.

На основе приведенных теоретических и экспериментальных исследований

созданы и внедрены в ОАО Харьковский машиностроительный завод “Свет шахтера” эффективные операции окончательного продольного и врезного шлифования деталей приводов шахтных конвейеров и твердосплавных инструментов, используемых для их механической обработки, позволяющие повысить производительность и снизить себестоимость обработки при обеспечении требуемой точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей.

**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., Ковальчук А.Н. Оптимизация структуры процесса съема припуска при механической обработке. – Вісник НТУ”ХП”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Транспортне машинобудування. – Харків: НТУ “ХП”. – 2005. – № 37. – С. 169-176. 3. Новиков Ф.В., Ковальчук А.Н. Напряженное состояние режущего зерна алмазного круга при шлифовании. – Вісник НТУ”ХП”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХП”. – 2005. – № 24. – С. 158-164.

**УДК 621.762.71**

## **ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СПЕКАНИЯ АЛМАЗСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Шепелев А.А.,** докт. техн. наук, **Головко Л.Ф.,** докт. техн. наук, **Сороченко В.Г.,** канд.техн. наук (г. Киев, Украина)

*Analysis of present methods and problems of making high-quality compositions containing superhard materials is presented. Variants of solving these problems are proposed. The peculiarities of application of laser radiation for sintering composite diamond containing materials are considered.*

Основной задачей технологии изготовления инструментов из сверхтвердых материалов, в том числе и алмазных, является получение необходимой формы и размеров, обеспечение прочного закрепления на рабочих поверхностях абразивных зерен, придание им режущей способности, которая должна непрерывно сохраняться в процессе работы. К настоящему времени известны различные методы изготовления инструментов такого типа. Прежде всего это способы термического спекания порошковых материалов в печах или прямым пропусканием электрического тока, получение инструментальных композитов способами гальванического осаждения, пламенного, детонационного, электронно-лучевого напыления и др. [1]. Основными проблемами существующей технологии изготовления алмазного инструмента и, в частности тонких алмазных отрезных кругов, спеканием в пресс-формах являются большая неоднородность структуры алмазсодержащего слоя и связанные с этим остаточные деформации корпуса круга, низкая жесткость круга в осевом направлении, недостаточная его износостойкость, которая снижается по мере уменьшения толщины алмазсодержащего слоя, низкая производительность.

На основании анализа известных подходов и особенностей неизотермических методов спекания установлено, что результаты исследований лазерного спекания многокомпонентных композиционных материалов с определенным градиентом свойств полученными за последние 10-15 лет свидетельствуют о том, что использование лазерного излучения для формирования износостойких алмазсодержащих композитов является перспективным направлением в части создания инструментальных композитов из сверхтвердых материалов [2,3]. Во-первых, он позволяет

сформировать инструмент практически любой конфигурации, во-вторых, использовать при спекании значительно более широкий спектр связок, в том числе и таких, которые требуют температур нагрева, значительно превышающих предельные, например, соответствующих началу окисления алмазов. Кроме этого, такие температуры нагрева позволяют обеспечить металлургическую связь между алмазодержащим слоем и стальным корпусом инструмента, что также обуславливает повышение его прочностных характеристик.

Экспериментальные исследования процесса лазерного спекания композитов из сверхтвердых материалов проводились на специальном технологическом комплексе. В состав комплекса входил мощный электроразрядный  $\text{CO}_2$  лазер, устройство для транспортирования, фокусирования и контроля параметров излучения, пяти координатный стол с системой программного управления. Лазерное излучение с длиной волны  $\lambda=10,6$  мкм и мощностью излучения  $P=200 - 1500$  Вт сфокусировалось плоско-выпуклой сферической линзой из  $\text{KCl}$  с фокусным расстоянием  $F=300$  мм. При этом диаметр пятна фокусирования изменялся в пределах  $d_o=0,7-0,8$  мм, скорость перемещения детали относительно луча  $v = 0,2-4,8$  м/мин.

Одной из основных задач исследования являлось определение максимальных значений температур сверхскоростного лазерного нагрева различных синтетических и природных алмазов и соответствующих им условий облучения, при которых не наблюдается ухудшение их прочности.

Установлено, что лазерный кратковременный нагрев алмазов АС125 400/315, АС160 400/315 на воздухе при времени воздействия 0,2-0,4 с до температур 1200-1500 °С не приводят к их термическому разрушению и ощутимой графитизации. Исключения составляют алмазы, которые имеют исходную дефектную структуру.

Доказана принципиальная возможность использования в качестве связок износостойких и прочных порошковых сплавов на основе никеля типа ХТН и железа типа ПС12НВКС1 с управляемыми свойствами. Этому способствует установленный факт прочного схватывания алмазных зерен связкой с образованием на их поверхности тонких металлических пленок, а также эффект образования в условиях лазерного оплавления четко упорядоченных однослойных групп или цепочек алмазных зерен.

Для устранения остаточных термических деформаций, которые возникают при лазерном спекании, получения необходимой геометрии и качества поверхности алмазодержащего рабочего слоя инструмента процесс лазерного облучения объединен с локальным деформированием алмазодержащего слоя в нагретом состоянии.

Разработаны способы и технологические схемы термодиформационного спекания алмазодержащих композитов с применением сканирующего лазерного луча методом послойного наращивания, принципиальные схемы которых приведены на рис. 1 и рис. 2. Указанные схемы реализуются соответствующими технологическими устройствами на базе мощного  $\text{CO}_2$  лазера с соответствующими узлами и приборами для измерения выходных параметров лазерного излучения.

Разработана математическая модель процесса лазерного спекания алмазодержащих композитов, в качестве которой использована трехмерная нелинейная нестационарная задача теплопроводности с использованием обобщенной постановки задачи Стефана. Решение задачи выполнено численным методом конечных элементов. Особенностью задачи было наличие в системе трех различных компонентов,

материалы которых существенно разнятся по своим физико-механическим и теплофизическим свойствам – связка, корпус инструмента, матрица. Для повышения точности расчетов и сокращения времени обсека применен оригинальный алгоритм адапирования размещения неравномерной сетки, которая постоянно изменяется в пространстве и времени. Получено распределение температур по слоям этой системы. Установлены условия облучения, при которых связка равномерно нагревается до температуры плавления, а поверхность корпуса инструмента и формирующей матрицы, контактирующей с ней, нагревается до температур 400-500 °С. Это дает основание считать, что связка не будет иметь адгезионного сцепления с материалом матрицы. Кроме того, полученные результаты по распределению температур в матрице позволяют сделать важный вывод о том, что если изготовить матрицу из меди, то ее массы достаточно для эффективного охлаждения.

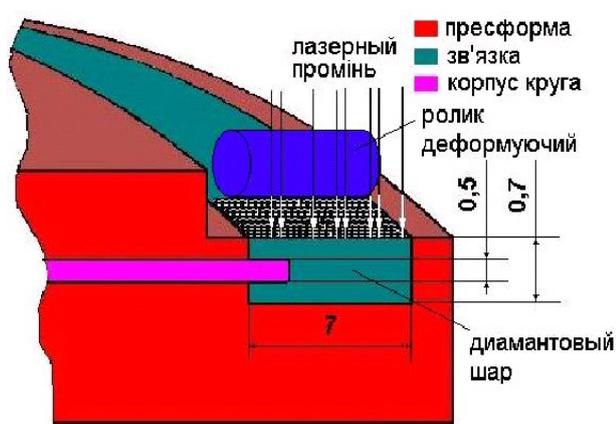


Рис.1. Схема термодформационного спекания алмазсодержащего композита с использованием сканирующего лазерного пучка.

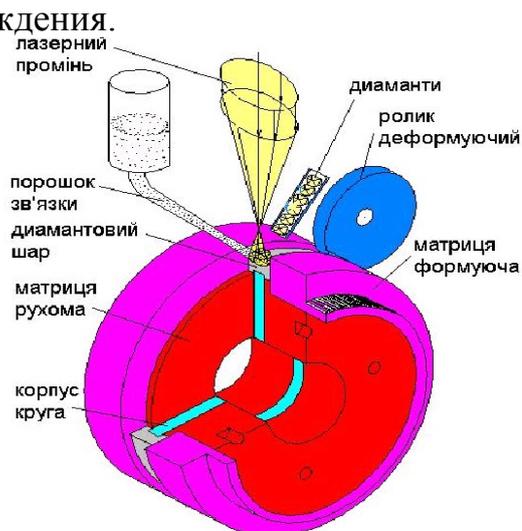


Рис.2.Схема послойного лазерного спекания алмазсодержащих композитов в радиальном направлении.

Определены оптимальные энергетические параметры процесса лазерного спекания (мощность 1,0-2,5 кВт, диаметр пятна фокусирования 0,7-2,0 мм, амплитуда 7 мм, частота сканирования 150-200 Гц, скорость относительного движения лазерного луча и матрицы 0,2-1,0 м/мин) и установлены основные его закономерности, которые позволили научно обосновано выбирать рациональные условия спекания. Так, установлено, что наиболее эффективной схемой подачи порошкового материала есть подача вслед лазерного луча. При этом затраты порошка связки должны находится в пределах 0,3-0,5 г/с. Установлен температурный интервал 500-600 °С, в пределах которого целесообразно применять пластическое деформирование алмазсодержащего слоя. В зависимости от скорости относительного движения и параметров излучения величина пластического деформирования и координата точки динамического воздействия варьируется, соответственно, в пределах 40 - 60 кгс и 10 - 14 мм.

**Литература:** 1. Инструменты из сверхтвердых материалов // Под ред. Н.В.Новикова. – М.:Машиностроение, 2005. – 555 с.:ил. (Б-ка инструментальщика). 2. В.В.Скорород. Спекание порошковых материалов при электротермическом, плазменном и лазерном нагреве // Матеріалознавство XXI сторіччя. – Київ. Наук. думка, 1998. –С.228 – 248. 3. V.S.Kovalenko, L.F.Golovko, O.Exsan, A.A.Goncharuk, N.V.Novikov, A.A.Shepelev, V.G.Sorochenko FEATURES OF APPLICATION OF LASER TECHNOLOGY FOR SINTERING DIAMOND COMPOSITE MATERIALS // (2005) Laser Technologies in Welding and Materials Processing. Kiev: E.O.Paton Electric Welding Institute, NASU. P.121-125.

## РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ШЛИФОВАНИЯ С УЧЕТОМ ДВИЖЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ИСТОЧНИКА ВГЛУБЬ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ДЕТАЛИ

**Новиков Ф.В.**, докт. техн. наук, **Яценко С.М.** (г. Харьков, Украина)

*Calculation of temperature of grinding is offered in view of movement of a thermal source deep into a superficial layer of a processable detail.*

Основываясь на известных подходах к расчету температуры шлифования, предложенных проф. Якимовым А.В. [1] и в наших работах [2, 3], в настоящей статье приведено новое решение задачи определения температуры шлифования с учетом движения теплового источника вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали. Иными словами, получено уточненное аналитическое решение с учетом перерезания адиабатических стержней, которыми условно представлен обрабатываемый материал, рис. 1. Будем считать, что в процессе шлифования часть стержня, равная величине снимаемого припуска (или в первом приближении – равная глубине шлифования  $t$ ) перерезается шлифовальным кругом, рис. 1. Предположим, что за время действия теплового источника  $\tau$  произошло перерезание стержня длиной  $l_1$ , т.е. тепловой источник переместился вдоль стержня на величину  $l_1 = V_{рез} \cdot \tau$ , и за это время в результате резания выделено количество тепла  $Q$  (где  $V_{рез}$  – скорость перерезания стержня, м/с). Это тепло, во-первых, ушло на нагревание стержня длиной  $l_1$  (затрачено количество тепла  $Q_1$ ), во-вторых, на нагревание стержня длиной  $l_2$  за счет теплопроводности обрабатываемого материала (затрачено количество тепла  $Q_2$ ), рис. 1:

$$Q = Q_1 + Q_2. \quad (1)$$

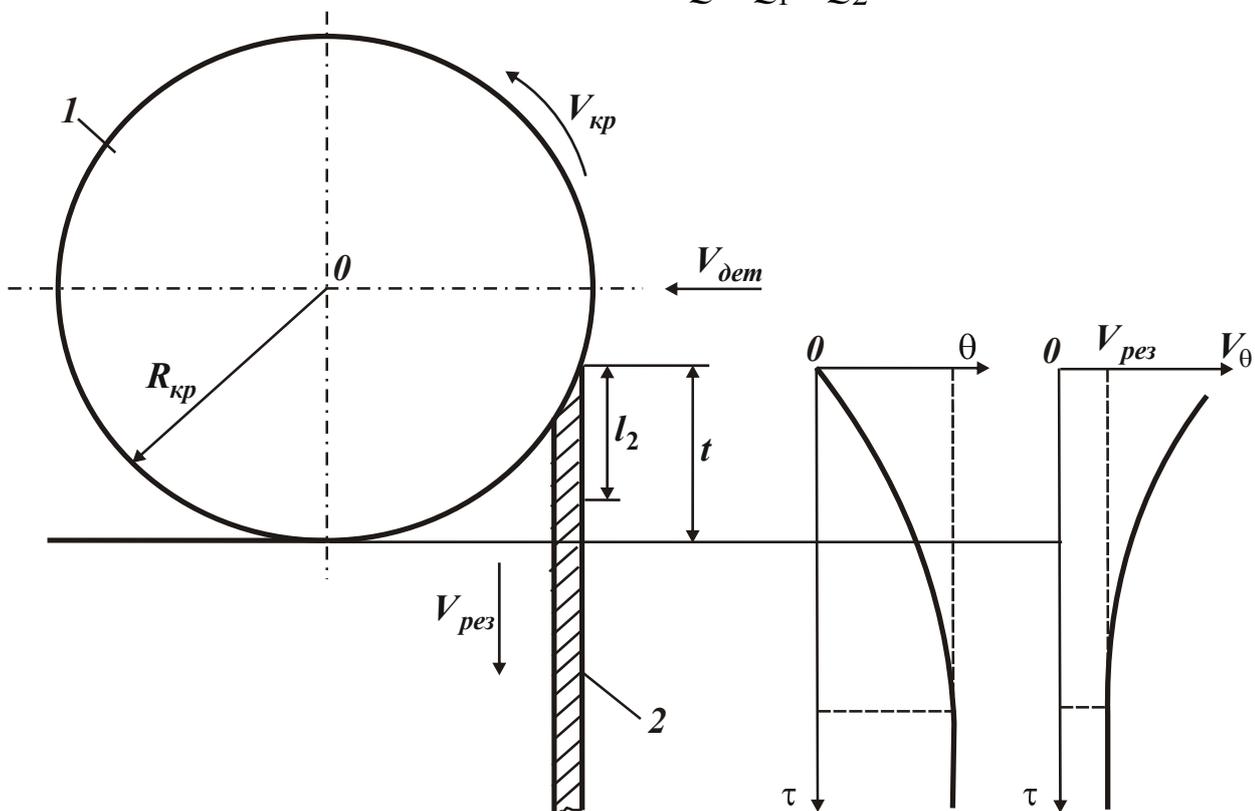


Рис. 1. Расчетная схема шлифования с учетом перерезания стержня: 1 – круг; 2 – стержень.

Количество тепла  $Q_1$  можно математически выразить следующим образом. Разобьем стержень длиной  $l_1$  на бесконечное множество элементарных участков длиной  $\Delta l$  (рис. 1). Предположим, что каждый из них нагрелся до разной температуры: первый – до температуры  $\theta_1$ , второй – до температуры  $\theta_2$  и т.д. Тогда количество тепла, затраченное на нагрев первого участка стержня длиной, будет равно:

$$Q_{11} = c \cdot m_1 \cdot \theta_1, \quad (2)$$

где  $c$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);  $m_1 = \rho \cdot V_1 = \rho \cdot S \cdot \Delta l$  – масса первого участка стержня длиной  $\Delta l$ , кг;  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $V_1$  – объем первого участка стержня длиной  $\Delta l$ , м<sup>3</sup>;  $S$  – площадь поперечного сечения стержня, м<sup>2</sup>.

После преобразования зависимость (2) примет вид:

$$Q_{11} = c \cdot \rho \cdot S \cdot \Delta l \cdot \theta_1. \quad (3)$$

Аналогичным образом определяются значения количества тепла  $Q_{12}$  и  $Q_{1n}$ , затрачиваемые на нагрев второго и  $n$ -ного участков стержня:

$$Q_{12} = c \cdot \rho \cdot S \cdot \Delta l \cdot \theta_2, \quad (4)$$

$$Q_{1n} = c \cdot \rho \cdot S \cdot \Delta l \cdot \theta_n. \quad (5)$$

Суммарное количество тепла, затрачиваемое на нагрев всего стержня длиной, определится:

$$Q_1 = Q_{11} + Q_{12} + \dots + Q_{1n} = \sum_i^n Q_{1i}. \quad (6)$$

С учетом зависимостей (3), (4) и (5), зависимость (6) выразится:

$$Q_1 = c \cdot \rho \cdot S \cdot \sum_i^n \theta_i \cdot \Delta l, \quad (7)$$

где  $\theta_i$  – температура нагрева  $i$ -того (текущего) участка стержня длиной  $l_1$ .

В зависимости (7) сумму слагаемых можно представить в виде интеграла:

$$Q_1 = c \cdot \rho \cdot S \cdot \int_0^\tau \theta \cdot dl, \quad (8)$$

где  $\theta$  – функция температуры нагрева стержня длиной  $l_1$  от времени;  $dl = \Delta l = V_{рез} \cdot d\tau$ ;  $V_{рез}$  – скорость перерезания стержня, м/с;  $d\tau$  – время, за которое происходит перерезание стержня длиной  $dl$ .

После преобразований зависимость (8) примет вид:

$$Q_1 = c \cdot \rho \cdot S \cdot V_{рез} \cdot \int_0^\tau \theta \cdot d\tau. \quad (9)$$

Определим теперь количество тепла  $Q_2$ , затрачиваемое на нагрев стержня длиной  $l_2$  (рис. 1). Для этого воспользуемся известной из курса физики зависимостью для определения количества тепла, протекшего через стержень длиной  $l_2$  в результате его теплопроводности:

$$Q_2 = \lambda \cdot S \cdot \frac{\theta_{2нач} - \theta_{2кон}}{l_2} \cdot \tau_2, \quad (10)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К;  $\theta_{нач}$  – температура на торце оставшееся после перерезания части стержня длиной  $l_2$ ;  $\theta_{2кон} = 0$  – температура на конце стержня длиной  $l_2$  (равна нулю); – время нагрева стержня длиной  $l_2$ .

Будем считать, что количество тепла, затрачиваемое на нагрев стержня длиной  $l_2$

$$Q_2 = c \cdot m \cdot \theta_2 \cdot 0,5 \quad (11)$$

равно количеству тепла, определяемому зависимостью (10), протекшего через стержень длиной  $l_2$  в результате его теплопроводности.

В зависимости (11) приняты следующие обозначения:  $m$  – масса стержня длиной  $l_2$ , кг;  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $V_2$  – объем стержня длиной  $l_2$ , м<sup>3</sup>;  $S$  – площадь поперечного сечения стержня, м<sup>2</sup>;  $\theta_2 = \theta_{2нач}$  – температура на торце оставшейся после перерезания части стержня длиной  $l_2$ . Введенный в зависимость (11) коэффициент 0,5 определяет среднюю температуру нагрева стержня длиной  $l_2$ .

После преобразований зависимость (11) примет вид:

$$Q_2 = 0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot S \cdot l_2 \cdot \theta_2 \quad (12)$$

Выразим длину стержня  $l_2$  с помощью зависимости (10). Для этого примем в зависимости (10):  $Q_2 = N \cdot \tau_2$ ;  $\theta_{2нач} - \theta_{2кон} = \theta_2$ , где  $N$  – мощность теплового источника.

Разрешая зависимость (10) относительно длины  $l_2$ , имеем:

$$l_2 = \frac{\lambda \cdot S \cdot \theta_2}{N} \quad (13)$$

Подставим зависимость (13) в зависимость (12):

$$Q_2 = 0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot S^2 \cdot \frac{\theta_2^2}{N} \quad (14)$$

Таким образом, определено количество тепла  $\theta_2$ , затрачиваемое на нагревание стержня длиной  $l_2$ . Подставляя полученные зависимости (9) и (14) в зависимость (1), определим общее количество тепла, которое ушло на нагревание двух частей стержня длиной  $(l_1 + l_2)$ :

$$Q = c \cdot \rho \cdot S \cdot V_{рез} \cdot \int_0^{\tau} \theta \cdot d\tau + 0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot S^2 \cdot \frac{\theta_2^2}{N} \quad (15)$$

В свою очередь общее количество тепла  $Q$  можно представить:

$$Q = N \cdot \tau \quad (16)$$

где  $N$  – мощность теплового источника;  $\tau$  – время перерезания стержня длиной  $l_1$ , равное времени действия теплового источника.

Подставим зависимость (16) в зависимость (15):

$$c \cdot \rho \cdot S \cdot V_{рез} \cdot \int_0^{\tau} \theta \cdot d\tau + 0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot S^2 \cdot \frac{\theta_2^2}{N} = N \cdot \tau \quad (17)$$

В результате пришли к интегральному уравнению, в котором неизвестной величиной является температура, зависящая от времени  $\tau$ .

Для упрощения решения уравнения (17) продифференцируем температуру по времени  $\tau$ , т.е. продифференцируем все слагаемые уравнения (17) с учетом  $\theta(\tau) = \theta_2$ :

$$c \cdot \rho \cdot S \cdot V_{рез} \cdot \theta(\tau) + c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot S^2 \cdot \frac{\theta_2 \cdot \theta_2'}{N} = N, \quad (18)$$

где  $\theta_2'$  – первая производная функции  $\theta_2$  по времени  $\tau$ ;  $\theta(\tau)$  – температура на последнем элементарном участке стержня длиной  $l_1$ .

В результате пришли к дифференциальному уравнению первого порядка с учетом  $\theta_2 = \theta$ :

$$\theta' \cdot \theta + A \cdot \theta = B, \quad (19)$$

где  $A = \frac{V_{рез} \cdot N}{\lambda \cdot S}$ ;  $B = \frac{N^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot S^2}$ .

Решение дифференциального уравнения (19) с учетом начального условия  $\theta(\tau = 0) = 0$ :

$$\theta = \frac{B}{A} \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{A^2}{B} \cdot \left( \tau + \frac{\theta}{A} \right)} \right] = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{рез} \cdot l_1}{\lambda} \cdot e^{-\frac{c \cdot \rho}{\sigma} \cdot \theta}} \right]. \quad (20)$$

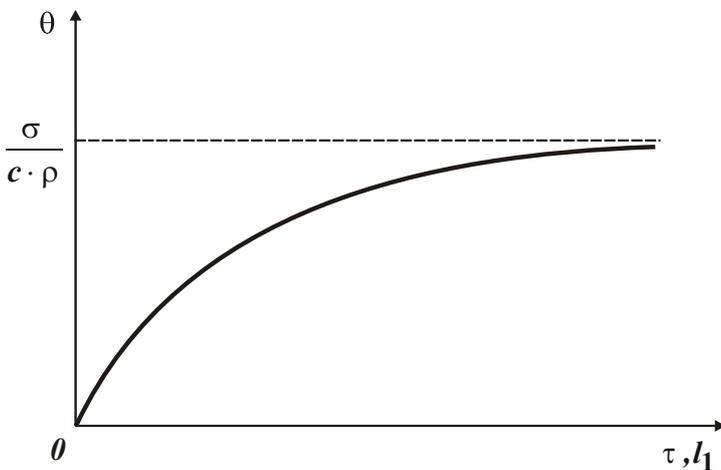


Рис. 2. Зависимость температуры  $\theta$  от времени  $\tau$  и длины  $l_1$ .

где  $\sigma$  - условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>.

Наличие в зависимости (20)

множителя  $e^{-\frac{c \cdot \rho}{\sigma} \cdot \theta}$  усиливает рост температуры  $\theta$  с увеличением времени  $\tau$  (соответственно длины перерезанной части стержня  $l_1$ ). Общий вид зависимости  $\theta$  от  $\tau$  (и  $l_1$ ) показан на рис. 2. Температура  $\theta$  с увеличением времени  $\tau$  температура  $\theta$  непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к значению  $\frac{\sigma}{c \cdot \rho}$ .

Учитывая сложный характер взаимосвязи температуры  $\theta$  с временем  $\tau$ , введем новый параметр – относительную величину температуры  $z = \frac{\theta}{\left( \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \right)}$  и проведем

анализ его изменения. Для этого выразим в зависимости (20) температуру  $\theta$  через безразмерную величину  $z$ :

$$l_1 = -\frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{рез}} \cdot [\ln(1-z) + z] = \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{рез}} \cdot \bar{l}_1, \quad (21)$$

где  $\bar{l}_1 = -\ln(1-z) - z$ .

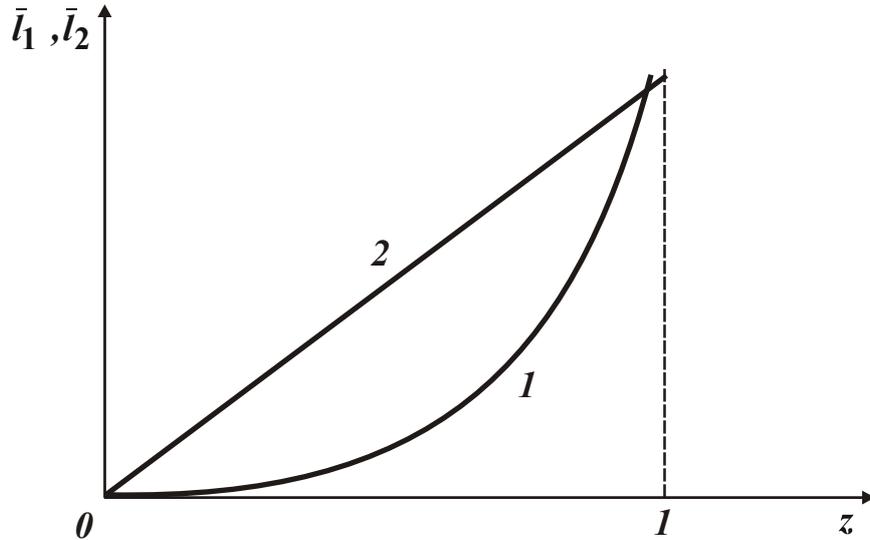


Рис. 3. Характер изменения безразмерных величин  $\bar{l}_1$  (1) и  $\bar{l}_2$  (2) в зависимости от относительной величины температуры  $z$ .

В результате пришли к довольно простой зависимости для определения длины перерезанной части стержня  $l_1$ . В табл. 1 и на рис. 3 приведены расчетные значения  $\bar{l}_1$  в зависимости от относительной величины температуры  $z$ .

Таблица 1

Расчетные значения  $\bar{l}_1$

$z$	0,091	0,167	0,333	0,5	0,632	0,85	0,9	0,99	0,999	0,9999
$\bar{l}_1$	0,004	0,015	0,072	0,193	0,368	1,047	1,4	2,005	3,6	6,0

Как видим, чем больше безразмерная величина  $\bar{l}_1$ , тем больше относительная величина температуры  $z$ , которая асимптотически приближается к единице. По такому же закону будет изменяться относительная величина  $z$  в зависимости от времени  $\tau$ :

$$\tau = \frac{l_1}{V_{рез}} = -\frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{рез}^2} \cdot [\ln(1-z) + z] = \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{рез}^2} \cdot \bar{l}_1. \quad (22)$$

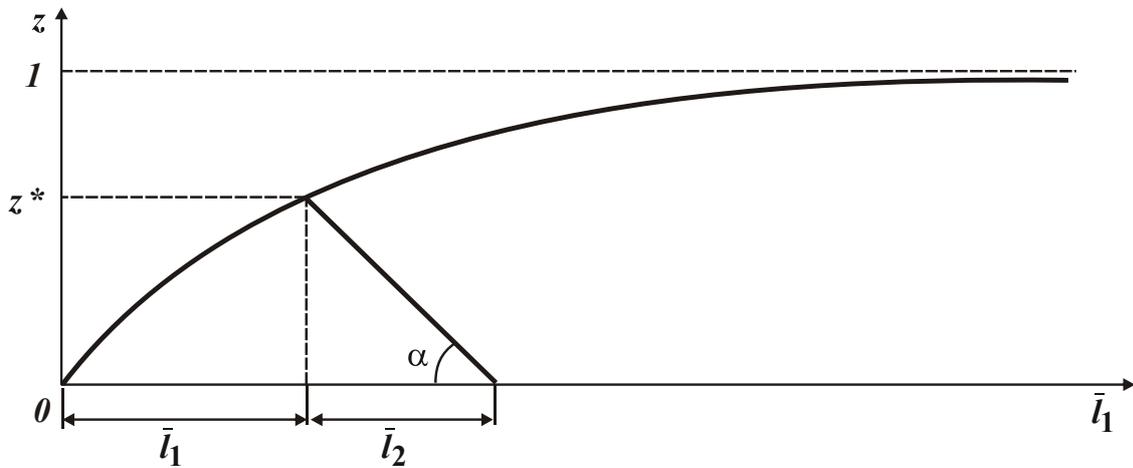
Установим теперь характер изменения длины стержня  $l_2$ , определяемой зависимостью (13), учитывая принятое ранее обозначение  $\theta_2 = \theta$ , мощность теплового источника  $N$  в виде  $N = \sigma \cdot S \cdot V_{рез}$  и  $z$ :

$$l_2 = \frac{\lambda \cdot z}{c \cdot \rho \cdot V_{рез}} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{рез}} \cdot \bar{l}_2, \quad (23)$$

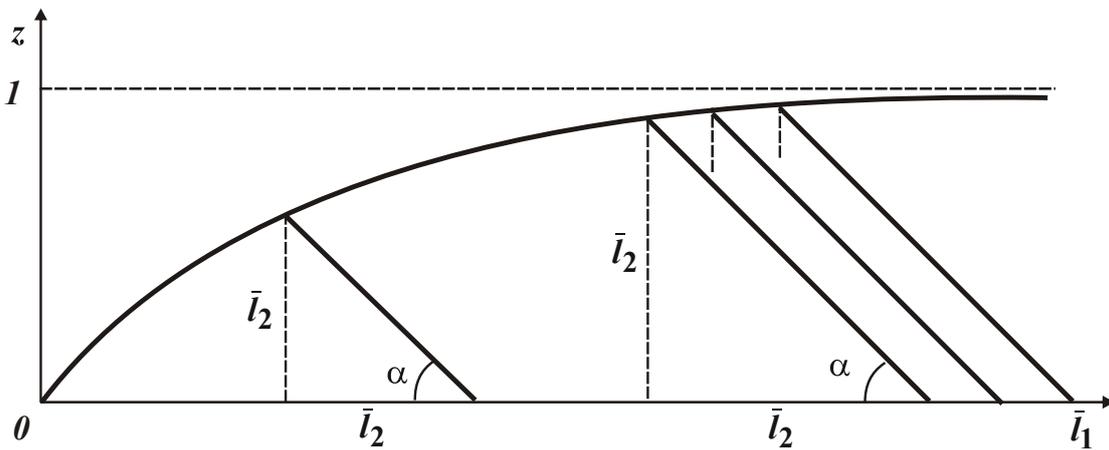
где  $\bar{l}_2 = z$ .

Зависимости (21) и (23) отличаются лишь вторым безразмерным множителем. На рис. 3 показан характер изменения безразмерных величин  $\bar{l}_1$  и  $\bar{l}_2$  в зависимости от относительной величины температуры  $z$ , изменяющейся в пределах  $0 \dots 1$ . Как

видно, с увеличением  $z$  безразмерная величина  $\bar{l}_1$  непрерывно увеличивается, стремясь асимптотически к бесконечности при значении  $z \rightarrow 1$ . Безразмерная величина  $\bar{l}_2$  увеличивается по линейному закону с увеличением  $z$  в пределах  $z=0 \dots 1$ . При  $z \geq 1$  функция  $\bar{l}_2$  не существует.



*a*



*б*

Рис. 4. Зависимость относительная величина температуры  $z$  от безразмерной величины  $\bar{l}_1$ .

На рис. 4,а представлен преобразованный график (рис. 3) относительной величины температуры  $z$  от безразмерной величины  $\bar{l}_1$ . Как видно, с увеличением  $\bar{l}_1$  относительная величина температуры  $z$  непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к единице. На этом же рисунке показан характер изменения относительной величины температуры  $z$  на участках рассматриваемого адиабатического стержня с длинами  $l_1$  и  $l_2$ . На участке стержня длиной  $l_1$ , соответствующей безразмерной величине  $\bar{l}_1$ , относительная величина температуры  $z$  изменяется нелинейно (по экспоненциальному закону), а на участке длиной  $l_2$ , соответствующей безразмерной величине  $\bar{l}_2$ , – линейно. При этом безразмерная величина  $\bar{l}_2$  равна ординате графика  $z$ , т.е. показанный на рис. 4,а угол  $\alpha$  равен  $45^\circ$ .

На рис. 4,б показан характер изменения относительной величины температуры  $z$  на двух участках рассматриваемого стержня для различных значений  $\bar{l}_1$  (различ-

ных значений длительности действия теплового источника  $\tau$ ). Как видно, с увеличением  $\bar{l}_1$  увеличивается пропорционально безразмерная величина  $\bar{l}_2$  и относительная величина температуры  $z$ . Угол  $\alpha$ , показанный на рис. 4,б, всегда остается постоянным, равным  $45^0$ . При  $z \rightarrow 1$  безразмерная величина  $\bar{l}_2$  практически стабилизируется и не зависит от длины перемещения теплового источника  $\bar{l}_1$ , т.е. от длительности действия теплового источника  $\tau$ .

Для наглядности в табл. 2 приведены расчетные значения безразмерных величин  $\bar{l}_1$  и  $\bar{l}_2$  в зависимости от величины  $z$ .

Таблица 2

Расчетные значения безразмерных величин  $\bar{l}_1$  и  $\bar{l}_2$

$z$	0,091	0,167	0,333	0,5	0,632	0,85	0,9	0,99	0,999	0,9999
$\bar{l}_1$	0,004	0,015	0,072	0,193	0,368	1,047	1,4	2,005	3,6	6,0
$\bar{l}_2$	0,091	0,167	0,333	0,5	0,632	0,85	0,9	0,99	0,999	0,9999

Из табл. 2 следует, что при  $z < 0,8$  справедливо неравенство  $\bar{l}_2 > \bar{l}_1$ , а при  $z > 0,8$  – наоборот,  $\bar{l}_2 < \bar{l}_1$ . Причем, начиная с  $z = 0,8$  безразмерная величина  $\bar{l}_2$  остается практически постоянной с изменением  $z$ , а безразмерная величина  $\bar{l}_1$  – непрерывно увеличивается. Из этого следует, что при  $z \rightarrow 1$  происходит стабилизация во времени безразмерной величины  $\bar{l}_2$  и соответственно температуры  $\theta$ . С учетом сказанного параметр  $l_2$  для условия стабилизации теплового процесса определяется:

$$l_2 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{рез}}. \quad (24)$$

Соответственно время  $\tau$  выразится:

$$\tau = \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{рез}^2}. \quad (25)$$

Расчет температуры  $\theta$  можно производить по зависимости:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot z, \quad (26)$$

используя расчетные значения  $z$ , приведенные в табл. 2, с учетом значений  $l_1 = V_{рез} \cdot \tau$ , т.е. в зависимости от длины  $l_1$  или времени  $\tau$ .

Таким образом, в работе предложена новая методика расчета температуры поверхностного слоя обрабатываемой детали  $\theta$  с учетом перерезания адиабатических стержней, которыми условно представлен обрабатываемый материал, т.е. с учетом движения теплового источника вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали.

**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. 4. "Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с. 3. 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.

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ТЕРМОФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗАГОТОВОК

Покинтелица Н.И., канд. техн. наук (г. Луганск, Украина)

*New constructions of cutting disks are offered. A disk with slots allows to get in the process of treatment the short weathering shaving and the same reduce expenses on its utilization. With the purpose of improvement of process the preliminary heating by a layer multinozzle gas-ring is offered, that will bring to diminishment both efforts over of cutting and intensity wear of instrument.*

Применение способа термофрикционной обработки (ТФО) позволяет значительно сократить расход дорогостоящих инструментальных сталей и сплавов при обработке металлов резанием. Высокая износостойкость инструмента и простота его конструкции уменьшает число переналадок оборудования во время работы, а также делает возможным его использование на существующих металлорежущих станках без каких-либо конструктивных изменений, что позволяет применять способ термофрикционного резания во всех отраслях машиностроительного производства и ремонта технологического оборудования.

Режущий диск для обработки плоскостей представляет собой круг диаметром 400...500 мм, толщиной 40...60 мм. Диск крепится к шпинделю вертикально-фрезерного станка нормализованным местом по типу торцовых фрез. В качестве материала для изготовления режущих дисков наибольшее распространение получили стали марок 65, 65Г, 50 [1–2].

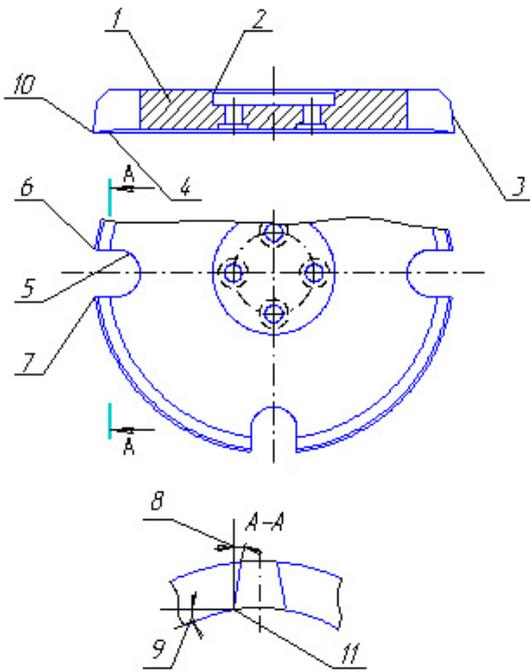
Необходимо отметить, что диски для термофрикционного резания, обладая положительными качествами круглого инструмента, сохраняют высокую стойкость в сравнении с обычным лезвийным инструментом, ибо они имеют большой диаметр, а участок режущей кромки, находящийся в непосредственном контакте с обрабатываемой поверхностью, постоянно обновляется. Кроме того, при вращении диска создается поток воздуха, охлаждающий его в процессе работы.

Известные конструкции режущих дисков имеют определенные недостатки: при обработке поверхностей получается сплошная длинная сливная стружка большого сечения. Такая стружка создает опасные условия работы и приводит к преждевременному износу инструмента, снижению качества обработанной поверхности, а также производительности. К тому же она неудобна для утилизации и дальнейшей переработки.

Предлагается усовершенствованная конструкция режущего диска, периферия корпуса которого снабжена пазами с внутренними режущими лезвиями, что обеспечивает прерывистый характер резания и приведет к уменьшению сечения стружки (рис. 1). Пазы имеют передний и задний углы резания, которые образуют внутренние режущие лезвия. Снятие припуска ведется сплошным наружным и внутренним режущими лезвиями.

Режущий диск содержит корпус 1, элементы крепления к шпинделю станка 2, переднюю поверхность 3, заднюю поверхность 4, паз 5, конечные точки 6 и 7 паза 5, передний угол внутреннего лезвия 8, задний угол внутреннего лезвия 9, внешнее сплошное 10 и внутреннее 11 режущие лезвия. Количество пазов может быть 4-6-8-10-12-16.

При обработке плоских поверхностей заготовок режущим диском данной кон-



Патент Украины № 64465А  
Рис.1. Режущий диск с пазами.

С целью усовершенствования процесса предлагается предварительный нагрев припуска многосопловой горелкой. Нагрев припуска приведет к уменьшению как усилия резания, так и интенсивности износа режущего диска.

Схема устройства и инструмент для термофрикционной обработки плоских поверхностей заготовок с использованием предварительного нагрева представлены на рис. 2. Устройство содержит режущий диск 1 с передней поверхностью 2 и задней поверхностью 3, шпиндель 4, державку 5, корпус фрезерной головки 6, болты 7 для крепления державки 5 к корпусу фрезерной головки 6 станка, подвижный кронштейн 8, шарнир с фиксатором 9, многосопловую горелку 10, болты 11 для крепления горелки 10 к подвижному кронштейну 8, вертикальное сопло 12, горизонтальное сопло 13, устройство 14 для подвода газов в смесительную камеру горелки 10. Стрелкой 15 указано направление вращения шпинделя 4. В начальном положении режущий диск не вращается. Вертикальные сопла горелки находятся над припуском заготовки перед режущим диском и позволяют горячей смесью кислорода и ацетилена разогреть припуск до температуры 500...600<sup>0</sup>С. Затем горелку отводят, чтобы не препятствовать процессу образова-

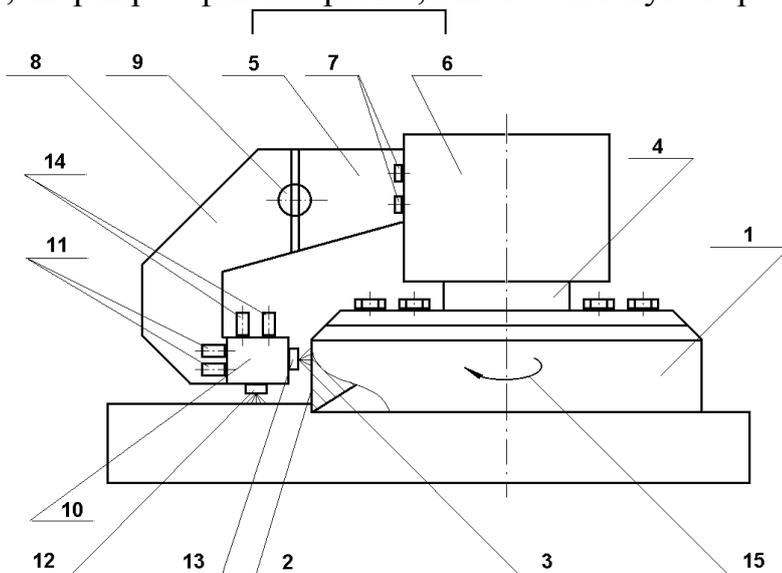


Рис.2. Схема устройства и инструмент для термофрикционной обработки плоских поверхностей заготовок.

струкции происходит образование стружки вследствие срезания припуска в разносторонних направлениях: в направлении подачи и поперек нее, и к тому же, осуществляется подрезание припуска по всей ширине обрабатываемой плоскости, которое обеспечивается за счет вращения режущего диска.

Образующаяся стружка имеет меньшую длину в сравнении с процессом обработки диском со сплошным режущим лезвием. Длина стружки зависит от количества пазов и их ширины на режущем диске.

При термофрикционной обработке металлов припуск разогревается быстровращающимся режущим диском. Недостатком данной схемы является то, что перед началом обработки диск разогревает “холодный” металл, что значительно уменьшает его стойкость. Именно в это время происходит максимальный износ диска, составляющий 50-70 % суммарного износа. С целью

улучшения процесса предлагается предварительный нагрев припуска многосопловой горелкой. Нагрев припуска приведет к уменьшению как усилия резания, так и интенсивности износа режущего диска.

ния стружки. Это обеспечивается подвижным кронштейном и шарниром с фиксатором. После чего включается рабочая подача и режущий диск врезается в нагретый материал. При этом износ диска уменьшается в 1,5-1,7 раза, так как прочность материала снижается в 5-7 раз.

Диск сохраняет свои режущие свойства в течение более продолжительного периода времени, если он термообработан. Для закалки режущего диска горизонтальные сопла горелки располагаются перед передней поверхностью 2. После того, как закалка передней поверхности закончена, подвижный кронштейн 8 отводится из зоны резания. По мере износа периодически производят заточку диска.

Таким образом, использование режущих дисков различной конструкции позволяет обеспечить высокую производительность и удовлетворительное качество обработанной поверхности в сочетании с высокой стойкостью и низкой себестоимостью инструмента, изготовленного из конструкционной стали, что определяют преимущества способа термофрикционной обработки металлов в сравнении с другими процессами резания.

**Литература:** 1. Зарубицкий Е.У., Талантов Н.В., Костина Т.П. Исследование процесса стружкообразования при обработке металлов диском трения //Вестник машиностроения.–1981.–№9.–С. 57–58. 2. Покинтелица Н.И. Применение высокоскоростного трения в резании металла.– К.:ВИПОЛ, 1993.–156 с.

**УДК 621.17**

## **ВПЛИВ СТУПЕНЯ І ШВИДКОСТІ ДЕФОРМАЦІЇ НА ВЕЛИЧИНУ ВНУТРІШНЬОЇ ЕНЕРГІЇ І ЗНОСОСТІЙКІСТЬ СТАЛІ**

**Браташевський О.Ю.**, канд. техн. наук, **Горбачова Л.В., Полякова А.Г.,  
Каплуновський В.О., Ключко О.Ю.** (м. Харків, Україна)

*Dependence of wear resistance and critical point redaction value  $A_{c1}$  of tape 25 steel on the degree and method of preliminary cold plastic deformation.*

Відомо, що при деформації сталі разом з пластичною деформацією відбувається збільшення дефектів кристалічної структури і суттєво зростає щільність дислокації ( $\rho$ ). Наприклад, у сталі 25 до деформації (відпалений стан)  $\rho$  дорівнює  $\approx 10^6 \text{ см}^{-2}$ , а перед руйнуванням  $\rho$  досягає величини  $\approx 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Проте, таке зростання  $\rho$  має нерівномірний характер – спочатку  $\rho$  збільшується швидко, а починаючи з певного ступеня деформації, ріст  $\rho$  уповільнюється, і врешті величина  $\rho$  стабілізується і зберігається до руйнування сталі. При цьому твердість мало чутлива до цих змін  $\rho$ ; вона зростає безперервно до самого руйнування. Кореляцію ж із зміною  $\rho$  має положення температури перлітних перетворень, а точніше – величина зниження температури  $A_{c1}$  деформованої сталі. Ця величина зниження  $A_{c1}$  характеризує той додатак до величини внутрішньої енергії сталі, який залишила пластична деформація. Вимірювання цієї величини однозначно визначає дислокаційний стан сталі, що і формує властивості сталей, які використовують.

В різноманітних механізмах деталі, які піддаються зносу, обов'язково підлягають дії пластичної деформації. Отже, встановити взаємозв'язок між дислокаційним станом сталі і її зносостійкістю за допомогою температури алотропічних перетворень є цікавим, в практичному сенсі, ще одним рішенням спільної задачі – зв'язок „структура – властивості”.

Мета даної роботи – дослідження впливу ступеня і швидкості деформації на внутрішню енергію і зносостійкість сталі.

Матеріалом дослідження вибрано сталь 25, яку, з метою одержання рівноваги структури, відпалювали при  $1200^{\circ}\text{C}$  впродовж 3 годин з наступним охолодженням разом з піччю до кімнатної температури. З відпаленої сталі виготовили зразки і піддали пластичній деформації при кімнатній температурі.

Було використано такі способи деформації:

1. Прокатка на лабораторному листопрокатному однокліттевому стані 150 з діаметром валків 150 мм і швидкістю їх обертання 30 об/хв. Зразки перед прокаткою мали розмір  $10 \times 70 \times (5; 3,33; 2,5; 2; 2,67; 1,43; 1,25; 1,11)$  мм. При цьому товщину зразків (5-1.11 мм) вибрали відповідно до ступеня обтискання, аби після прокатки з будь-яким обтисканням товщина зразків дорівнювала 1 мм з метою забезпечення ідентичних умов нагрівання при наступних операціях. Ступені деформації при прокатці становили 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 і 80%.

2. Одновісне стискування на машині Р-5 зі швидкістю руху затискача 46 мм/хв.. зразки перед стискуванням мали висоту, як і у випадку прокатки, відповідно до ступеня стискування. Інші розміри зразків вибирали таким чином, аби після стискування вони мали величину  $1 \times 4 \times 5$  мм для зіставлення результатів наступного диференційно - термічного аналізу. Ступені деформації при стисканні становили 10, 20, 30, 40, 50, 60 і 70%.

3. Кування на пневматичному одностояковому молоті з вагою бойка 150 кг і швидкістю в момент удару при осадці 800 см/с. Розмір зразків і ступінь деформації при куванні були такі ж, як і при одновісному стисканні.

Температуру  $A_{c1}$  холоднодеформованих і відпалених зразків визначали за допомогою диференційно - термічного аналізу при швидкостях нагрівання  $500^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ . Умови протікання  $\alpha \rightarrow \gamma$  перетворення були квазіізотермічні, тобто наближеними до ізотермічних. Одержанні при цьому значення  $A_{c1}$  відповідали (на підставі проведених порівняльних експериментів) температурі початку утворення аустеніту в ізотермічних умовах.

Тонку структуру зразків вивчали за методом електронної мікроскопії на електронному мікроскопі „JEM-200A” з прискорювальною напругою 200 кВ. Крім цього, вимірювали твердість зразків за допомогою твердоміра типу „Віккерс”. Швидкість деформації розраховували за формулою:

$$\dot{\epsilon} = \frac{V_{cp}}{\Delta h} \ln \frac{h_0}{h_1}, \quad (1)$$

де  $V_{cp}$  – середня швидкість деформування;  $\ln \frac{h_0}{h_1}$  - істинне звужування при зміні

товщини зразка від  $h_0$  до  $h_1$ ;  $\Delta h = h_0 - h_1$  – повне звужування.

Для кування і одновісного стискування за середню швидкість деформування брали середню швидкість руху інструменту. Для прокатки середню швидкість деформування визначали через діаметр ( $D$ ) і швидкість обертання ( $n$ ) валків наступним чином:

$$V_{cp} = \frac{1}{2} (V_{вих} + V_{вх}), \quad (2)$$

де  $V_{вих}$ ,  $V_{вх}$  – швидкості руху металу при виході з валків і при вході у валки, відпові-

дно.

При цьому: 
$$V_{\text{вих}} = \frac{\pi D n}{60} \quad (3)$$

На підставі умови сталості секундних об'ємів металу:

$$V_{\text{вх}} = V_{\text{вих}} \cdot \frac{h_1}{h_0} = \frac{\pi D n}{60} \cdot \frac{h_1}{h_0} \quad (4)$$

Підставляємо (4) і (3) в формулу (2), а потім в формулу (1) і одержуємо:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\pi D n}{120} \cdot \frac{h_0 + h_1}{\Delta h \cdot h_0} \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (5)$$

В результаті досліджень були одержані такі дані.

Критична точка  $A_{c1}$  сталі після відпалювання фіксувалася при  $725^{\circ}\text{C}$ , а після деформації – при нижчих температурах, що наведено в таблиці. Значення  $\Delta t$  в таблиці – це різниця між температурами  $A_{c1}$  відпаленої і здеформованої сталей.

Як видно з таблиці,  $\Delta t$  змінюється немонотонно в залежності від ступеня деформації. Наприклад для прокатки, якщо із збільшенням ступеня деформації до 40-50% спостерігається відносно різке зниження критичної точки  $A_{c1}$  (відповідно  $36-38^{\circ}\text{C}$ ), то подальше збільшення ступеня стискання до 80% призведе до менш значного приросту  $\Delta t$  ( $6-4^{\circ}\text{C}$ ). Такий характер залежності зниження  $A_{c1}$  від ступеня деформації є спільним для усіх трьох способів деформації і складається з двох стадій: перший – відносно інтенсивніший на початкових етапах деформації; друга - відносно невеликий ріст  $\Delta t$  при подальшому збільшенні деформації. Різниця в цих залежностях полягає лише в ступені деформації, при якому перша стадія переходить в другу. Так, перехід з першої стадії до другої після кування спостерігається при ступенях деформації близько 30%; після прокатки – при близько 40%, а після одновісного стискання – при 50-60%. Слід відзначити, що усім наведеним ступеням деформації відповідає одне й те ж значення  $\Delta t$ , яке дорівнює  $36^{\circ}\text{C}$ .

Таблиця

Залежність зносостійкості та величини зниження  $A_{c1}$  ( $\Delta t$ ) холодно формованої сталі 25 від швидкості ( $\dot{\epsilon}$ ) і ступеня деформації

Ступінь деформації, %	Способи деформації								
	Одночасне стискання			Прокатка			Кування		
	$\dot{\epsilon}$ , $\text{c}^{-1}$	$\Delta t$ , $^{\circ}\text{C}$	зносостійкість, хв/ч	$\dot{\epsilon}$ , $\text{c}^{-1}$	$\Delta t$ , $^{\circ}\text{C}$	зносостійкість, хв/ч	$\dot{\epsilon}$ , $\text{c}^{-1}$	$\Delta t$ , $^{\circ}\text{C}$	зносостійкість, хв/ч
10	0,76	8	15,1	106	11	18,2	7600	13,5	32,4
20	0,714	16,5	-	94,5	22	-	7140	27,0	-
30	0,67	24,0	18,9	83,2	31	22,8	6700	36,5	39,2
40	0,61	32,0	-	72,0	36	-	6100	39,5	-
50	0,5	35,0	29,7	61,2	38	28,3	5545	41,0	46,1
60	0,49	37,5	-	50,4	39,5	-	4900	42	-
70	0,41	38	25,5	39,5	40,5	31,0	4100	43	48,7
80	-	-	-	28,5	41,5	-	-	-	-

Крім цього, при будь-якому певному ступені деформації величина  $\Delta t$  залежить від швидкості деформації: чим більша  $\dot{\epsilon}$ , тим більша  $\Delta t$ . Але в межах конкретного способу деформації ця залежність зовсім протилежна. Залежність зносостійкості сталі від ступеня і швидкості деформації повністю корелює з величиною  $\Delta t$ .

Мікроструктурний аналіз показав, що на першій стадії залежності  $\Delta t$  від сту-

пеня деформації, коли має місце інтенсивний ріст  $\Delta t$ , в структурі сталі формується комірчаста дислокаційна структура фериту. На другій стадії цієї залежності (незначний приріст  $\Delta t$ ) дана комірчаста дислокаційна структура фериту вже сформована і не змінюється. Формування цієї структури відбувається до тих пір, поки  $\Delta t$  не досягне  $36^{\circ}\text{C}$ . Ця структура фериту на момент завершення формування має комірки з середнім розміром близько  $0,75$  і товщиною границь (джутоподібні скупчення дислокацій із щільністю  $10^{12}\text{см}^{-2}$ ) близько  $0,2\text{мкм}$ . Внутрішній об'єм комірки чистий від дислокацій. В разі подальшої деформації ( $\Delta t > 36^{\circ}\text{C}$ ) всередині комірок починає формуватися субкоміркова дислокаційна структура. Тобто, умовно кажучи, при деформації сталі відбувається подрібнювання її структури: спочатку завдяки формуванню грубих дислокаційних комірок, а далі – завдяки формуванню більш тонкої дислокаційної структури. Цими структурними змінами і пояснюється нерівномірне зростання  $\Delta t$  і зносостійкості сталі при збільшенні ступеня і швидкості деформації.

#### **Висновки:**

1. Зниження  $A_{c1}$  і зростання зносостійкості деформованої сталі залежить від ступеня і швидкості деформації.

2. Залежність величини зниження  $A_{c1}$  і величини зростання зносостійкості деформованої сталі від ступеня і швидкості деформації нерівномірна. Поки в сталі формується комірчаста дислокаційна структура (перша стадія деформації) зниження  $A_{c1}$  і збільшення зносостійкості відбуваються інтенсивно, а при подальшій деформації – значно повільніше.

3. Зносостійкість деформованої сталі визначається кількістю дислокацій, які з'явилися в структурі сталі в процесі її деформації. Цю кількість дислокацій можна виміряти величиною зниження  $A_{c1}$  сталі.

**Література:** 1. Браташевський О.Ю., Горбачова Л.В., Полякова А.Г., Польотов В.А. Положення критичної точки  $A_{c1}$  після холодної прокатки сталі 25. – Вісник ХДТУСГ. Вип.18. – Харків, 2003. – С. 215-219. 2. Браташевський О.Ю., Горбачова Л.В., Полякова А.Г., Польотов В.А., Каплунівський В.О. Дослідження метастабільної структури холоднодеформованої сталі 25. – Труды 10<sup>-ї</sup> Международной научно-технической конференции «Физические и компьютерные технологии». – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2004. – С. 185-187.

### **УДК 539.3**

#### **ПОСТРОЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ РЕШЕНИЙ НАЧАЛЬНО-КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ ПОЛЗУЧЕСТИ**

**Морачковский О.К.**, докт. техн. наук, **Ромашов Ю.В.**, канд. техн. наук  
(г. Харьков, Украина)

*This paper deals with common methods of theory of creep initial boundary value problems numerical solutions building. It is shown the Galerkin method based schemes are most universal. They are allow to synthesize all known parametrized solution continuation method based on boundary value problems solving during time integration step.*

**Постановка проблемы.** Прогнозирование поведения твердых тел в условиях непрерывного накопления деформаций ползучести требует решения нелинейных начально-краевых задач теории ползучести. Вид уравнений начально-краевых задач теории ползучести практически исключает возможности их аналитического решения, что и определяет актуальность проблемы разработки эффективных методов численного решения начально-краевых задач теории ползучести, адекватных

возможностям современной вычислительной техники. Задачи прогнозирования поведения твердых тел в условиях ползучести тесно связаны со многими научно-техническими задачами, в частности с задачей прогнозирования ресурса элементов конструкций, в том числе энергетического оборудования.

**Анализ исследований и публикаций.** В настоящее время, численные решения начально-краевых задач теории ползучести преимущественно осуществляют путем параметризации краевых задач об определении напряженно-деформированного состояния, выбирая в качестве параметров значения деформаций ползучести в рассматриваемый момент времени, с последующим продолжением решений краевых задач по выбранным параметрам. Такой подход эффективно применяется для решения разнообразных задач ползучести: ползучесть пластин, оболочек, двумерных и трехмерных областей сложной формы; решения краевых задач для заданных значений деформаций ползучести определяется преимущественно вариационными методами с использованием как локальных, так и глобальных аппроксимаций. Важной особенностью существующих исследований является анализ полученных численных решений, при практически полном отсутствии какого-либо детального рассмотрения вопросов, связанных с построением таких решений. Отсутствие детальных теоретических и прикладных исследований вопросов, связанных с построением численных решений начально-краевых задач теории ползучести весьма затрудняет практическое получение таких решений.

**Цель и постановка задачи.** Целью данного исследования является разработка наиболее общих подходов построения численных решений начально-краевых задач теории ползучести. Для реализации этой цели ставятся задачи: анализ распространенных постановок начально-краевых задач теории ползучести, построение численных решений на основе метода Бубнова-Галеркина, установление связи общего подхода с широко используемым методом продолжения решений по параметру.

1. Начально-краевые задачи теории ползучести и их численное решение. В самом общем случае начально-краевая задача теории ползучести твердого тела, занимающего объем  $\Omega$ , ограниченный поверхностью  $\partial\Omega$  может быть представлена дифференциальными уравнениями, граничными и начальными условиями, которые с использованием общепринятых обозначений записываются в следующем виде:

$$\sigma_{,j}^{ij} + f^i = 0, \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \varepsilon_{ij} = d_{ijkl}\sigma^{kl} + c_{ij}, \quad (1)$$

$$\dot{c}_{ij} = \frac{\dot{c}_e}{\sigma_e} \frac{\partial \Phi(\sigma_e, c_e, q_1, \dots, q_m; T)}{\partial \sigma_e} \frac{\partial \sigma_e}{\partial \sigma^{ij}}, \dot{c}_e = \varphi(\sigma_e, c_e, q_1, \dots, q_m; T), \quad (2)$$

$$\dot{q}_k = \dot{q}_k(\sigma_e, c_e, q_1, \dots, q_m; T)$$

$$h^i = -\lambda^{ij} T_{,j}, c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + h_{,i}^i - H = 0, \quad (3)$$

$$\sigma^{ij} n_j = p^i \quad (\partial\Omega_p \subset \partial\Omega), u_i = u_i^* \quad (\partial\Omega_u \subset \partial\Omega), \quad (4)$$

$$h^i = h_*^i \quad (\partial\Omega_h \subset \partial\Omega), T = T_s \quad (\partial\Omega_T \subset \partial\Omega); \quad (5)$$

$$c_{ij}|_{t=0} = 0, q_i|_{t=0} = q_{i0}, T|_{t=0} = T_0. \quad (6)$$

Начально-краевая задача (1)-(6), за счет введения внутренних структурных параметров  $q_1, \dots, q_m$  и соответствующих им кинетических уравнений, позволяет описать широкий класс процессов ползучести и повреждаемости в деформируемых телах. Далее предполагаем, что все функции из (1)-(6) обладают свойствами, обеспечивающими существование и единственность решения начально-краевой задачи теории ползучести.

Запись уравнений начально-краевой задачи теории ползучести в тензорной форме (1)-(6) позволяет анализировать и классифицировать математические модели с точки зрения учета или пренебрежения какими-либо факторами. Возможности алгоритмизации матричных операций делают более удобной при построении численных решений не тензорную, а матрично-векторную форму записи начально-краевых задач теории ползучести в виде:

$$D\dot{v} + Lv = f_{\Omega}, \quad \forall x \in \Omega, \quad (7)$$

$$Bv = f_{\partial\Omega}, \quad \forall x \in \partial\Omega, \quad (8)$$

$$v(0, x) = \tilde{v}(x), \quad (9)$$

где  $v = v(t, x)$  - вектор, составленный из неизвестных начально-краевой задачи (1)-(6),  $x$  - вектор, составленный из пространственных координат точки тела,  $D$ ,  $L$  - матрицы и  $f_{\Omega}$  - вектор, составленные по операторам и функциям уравнений (1)-(3);  $B$ ,  $f_{\partial\Omega}$ ,  $\tilde{v}(x)$  - матрица и векторы, составленные по операторам и правым частям краевых и начальных условий (4)-(6).

Для решения задачи (7)-(9) используем метод Бубнова-Галеркина. С этой целью представим искомое решение в виде аппроксимаций:

$$v_n = v_0 + \Phi \cdot a(t), \quad a(0) = a_0, \quad (10)$$

где  $\Phi$  - матрица со столбцами из принятых пробных функций, выбранных вместе с вектором  $v_0$  так, чтобы краевые условия задачи точно удовлетворялись при любом векторе  $a^T = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  коэффициентов аппроксимации,  $n$  - число пробных функций в аппроксимации;  $v_0 + \Phi \cdot a_0 = \tilde{v}(x)$ .

Следуя методу Бубнова-Галеркина, рассмотрим условие ортогональности невязки дифференциальных уравнений внутри исследуемой области:

$$\int_{\Omega} \Phi^T (D\dot{v}_n + Lv_n - f_{\Omega}) d\Omega = 0. \quad (11)$$

Без ограничения общности примем  $L$  линейным оператором, и, используя (11), поиск коэффициентов аппроксимации сведем к решению задачи Коши:

$$\dot{a} = M^{-1}(t) \cdot b(t, a), \quad a(0) = a_0; \quad (12)$$

где 
$$M(t) = \int_{\Omega} \Phi^T D\Phi d\Omega, \quad b(t, a) = \int_{\Omega} \Phi^T (f_{\Omega}(t, x, a) - Lv_0) d\Omega - \left( \int_{\Omega} \Phi^T L\Phi d\Omega \right) a,$$

$$f_{\Omega}(t, x, a) = f_{\Omega}(t, x, v_n(a)).$$

Получение численных решений по схеме (10)-(12) является наиболее общим подходом, поскольку содержит в себе как частный случай практически любой из из-

вестных подходов с использованием как глобальных, так и локальных аппроксимаций, в том числе широко распространенный метод конечных элементов, классический метод Рунге и др. [1].

2. Специальные методы решения начально-краевых задач теории ползучести. Различные специальные методы, в том числе и широко распространенный метод продолжения решений по параметру, можно получить как частный случай схемы (10)-(13), задаваясь частным видом операторов уравнения (7). Так, анализ уравнений (1)-(3) позволяет сделать вывод, что им отвечает частный вид операторов из уравнения (7):

$$v = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}, D = \begin{pmatrix} D_{11} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, L = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ L_{21} & L_{22} \end{pmatrix}, f_{\Omega} = \begin{pmatrix} f_{\Omega 1} \\ f_{\Omega 2} \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & B_{22} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$f_{\partial\Omega} = \begin{pmatrix} 0 \\ f_{\partial\Omega 2} \end{pmatrix}, \tilde{v}(x) = \begin{pmatrix} \tilde{v}_1(x) \\ \tilde{v}_2(x) \end{pmatrix}$$

Представим приближенное решение задачи (7) с операторами вида (13) аппроксимациями системой глобальных пробных функций:

$$v_{n1} = v_{01} + \Phi_1 \cdot a_1(t), a_1(0) = a_{01}, v_{n2} = v_{02} + \Phi_2 \cdot a_2(t), a_2(0) = a_{02}, \quad (14)$$

где  $\Phi_1, \Phi_2$  - матрицы со столбцами из принятых пробных функций, выбранных вместе с векторами  $v_{01}, v_{02}$  так, чтобы краевые условия задачи точно удовлетворялись при любых векторах  $a_1, a_2$  коэффициентов аппроксимации,  $n$  - число пробных функций в аппроксимации;  $v_{01} + \Phi_1 \cdot a_{01} = \tilde{v}_1(x), v_{02} + \Phi_2 \cdot a_{02} = \tilde{v}_2(x)$ .

Следуя методу Бубнова-Галеркина, подставим аппроксимации (14) в условие ортогональности (11) и, в результате, получим задачу Коши:

$$M_{11} \dot{a}_1 = b_1(t, a_1, a_2), \quad (15)$$

$$A_{21} a_1 + A_{22} a_2 = b_2,$$

$$\text{где } M_{11}(t) = \int_{\Omega} \Phi_1^T D_{11} \Phi_1 d\Omega, \quad A_{21} = \int_{\Omega} \Phi_2^T L_{21} \Phi_1 d\Omega, \quad A_{22} = \int_{\Omega} \Phi_2^T L_{22} \Phi_2 d\Omega,$$

$$b_1(t, a_1, a_2) = \int_{\Omega} \Phi_1^T f_{\Omega 1}(t, x, a_1, a_2) d\Omega,$$

$$b_2 = \int_{\Omega} \Phi_2^T f_{\Omega 2}(x) d\Omega - \int_{\Omega} \Phi_2^T L_{21} v_{01} d\Omega - \int_{\Omega} \Phi_2^T L_{22} v_{02} d\Omega,$$

$$f_{\Omega 1}(t, x, a_1, a_2) = f_{\Omega 1}(t, x, v_{n1}(a_1), v_{n2}(a_2)).$$

При помощи второго уравнения(15) выразим часть неизвестных задачи:

$$a_2 = A_{22}^{-1}(b_2(a_1) - A_{21} a_1). \quad (16)$$

Подставляя выражение (16) в первое уравнение (15) получим задачу Коши в канонической форме:

$$\dot{a}_1 = F(t, a_1), \quad a_1(0) = a_{01}, \quad (17)$$

где  $F(t, a_1) = b_1(t, a_1, A_{22}^{-1}(b_2(a_1) - A_{21} a_1))$ .

Соотношения (16), (17) по своей сути аналогичны широко используемому методу продолжения решений по параметру. Действительно, для задачи (7) с операторами вида (13) возможна параметризация вектора  $v_2$  по вектору  $v_1$ :

$$L_{22}v_2 = f_{\Omega 2} - L_{21}v_1; \quad B_{22}v_2 = f_{\partial\Omega 2}. \quad (18)$$

Представив вектор  $v_2$  в виде аппроксимации (14) и решая краевую задачу (18) для фиксированного  $v_1$ , с помощью метода Бубнова-Галеркина, перейдем к аналогичному (16) соотношению:

$$a_2 = A_{22}^{-1} \left( b_2 - \int_{\Omega} \Phi_2^T L_{21} v_1 d\Omega \right). \quad (19)$$

Таким образом, для определения вектора  $v_1$  в каждой точке тела следует решить задачу Коши следующего вида:

$$\begin{aligned} \dot{v}_1 &= D_{11}^{-1} f_{\Omega 1}(t, x, v_1, v_{n2}), \\ v_1(0, x) &= \tilde{v}_1(x). \end{aligned} \quad (20)$$

Между задачей (17), полученной при помощи общего подхода на основе метода Бубнова-Галеркина и задачей (20) имеется существенное различие. Оно заключается в том, что в задаче (17) искомыми являются функции времени, представляющие коэффициенты разложения вектора  $v_1$  по пробным функциям, а в задаче (20) искомыми функциями являются значения вектора  $v_1$  в точках тела. При использовании метода продолжения по параметру ограничиваются определением значений вектора  $v_1$  в ограниченном числе точек тела, специально выбранных таким образом, чтобы по найденным таким образом значениям  $v_1$  при помощи соотношения (19) найти вектор  $a_2$ . Обычно такие точки отвечают узлам квадратурных формул или узлам конечно-элементной сетки. Справедливо напрашивается вопрос: а можно ли, формально применяя метод Бубнова-Галеркина для решения начально-краевой задачи теории ползучести (7)-(9) с операторами частного вида (13), получить задачу вида (20), отвечающую методу продолжения по параметру, а не задачу вида (17)? Этот важный для практики вопрос требует отдельного рассмотрения, но, судя по всему, на него можно дать положительный ответ, при аппроксимации вектора  $v_1$  с использованием локальных, а не глобальных функций. В качестве таких локальных функций, можно предположить, должны отвечать дельта-функции, приводящие к методу коллокаций [1] в специально подобранных точках, отвечающих узлам квадратурных формул или конечно-элементной сетки.

3. Расчет ползучести диска паровой турбины. Для паровых турбин в условиях ползучести весьма привлекательными являются цельнокованные роторы. Однако технологические трудности изготовления поковок больших размеров заставляют для ступеней ЦНД, ЦСД, а в отдельных случаях и для последних ступеней ЦВД паровых турбин использовать сборные роторы [2], важным конструктивным элементом которых являются диски. Рассмотрим задачи ползучести вращающегося диска постоянного сечения радиусом  $b = 0,65$  м с центральным отверстием и без центрального отверстия (рис. 1). Операторы (14) дифференциальных уравнения начально-краевой задачи теории ползучести такого диска после исключения части неиз-

вестных имеют вид:

$$\mathbf{v}_1 = \begin{pmatrix} c_{rr} \\ c_{\theta\theta} \\ \omega \end{pmatrix}, \quad \mathbf{v}_2 = \begin{pmatrix} N_{rr} \\ N_{\theta\theta} \\ u_r \\ T \end{pmatrix}, \quad \mathbf{D}_{11} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{L}_{21} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{L}_{22} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{E} & \frac{\nu}{E} & \frac{\partial}{\partial r} & -\alpha \\ \frac{\nu}{E} & -\frac{1}{E} & \frac{1}{r} & -\alpha \\ -\frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r} & -\frac{1}{r} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{f}_{\Omega 1} = \begin{pmatrix} \frac{3}{2} \frac{B \left( \frac{1}{h\sqrt{2}} \sqrt{(N_{rr} - N_{\theta\theta})^2 + N_{rr}^2 + N_{\theta\theta}^2} \right)^{n-1}}{(1-\omega)^n} \left( \frac{2}{3} N_{rr} - \frac{1}{3} N_{\theta\theta} \right)} \\ \frac{3}{2} \frac{B \left( \frac{1}{h\sqrt{2}} \sqrt{(N_{rr} - N_{\theta\theta})^2 + N_{rr}^2 + N_{\theta\theta}^2} \right)^{n-1}}{(1-\omega)^n} \left( \frac{2}{3} N_{\theta\theta} - \frac{1}{3} N_{rr} \right)} \\ \frac{A \left( \frac{1}{h\sqrt{2}} \sqrt{(N_{rr} - N_{\theta\theta})^2 + N_{rr}^2 + N_{\theta\theta}^2} \right)^k}{(1-\omega)^k} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{f}_{\Omega 2} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho \Omega^2 h r \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (21)$$

Результаты расчетов представлены на рис. 2 в виде зависимости времени разрушения диска от величины радиуса центрального отверстия и от напряжения  $\sigma_0$  от центробежных сил лопаток. Видно, что с увеличением центрального отверстия время до разрушения диска существенно уменьшается.

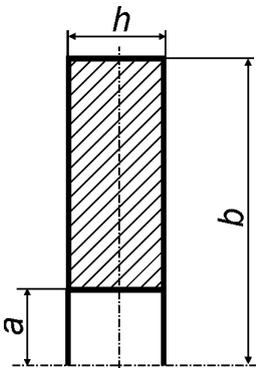


Рис. 1. Основные размеры диска.

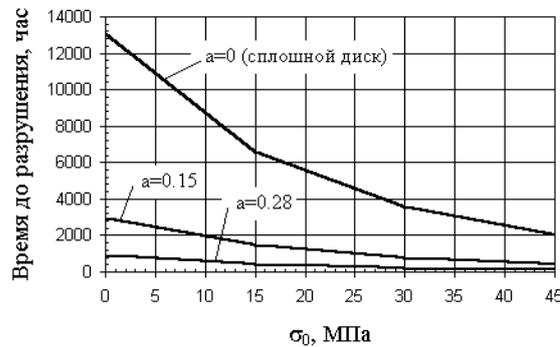


Рис.2. Влияние конструктивных параметров на прочность диска.

**Выводы.** Показано, что широко распространенный в теории ползучести метод продолжения решений по параметру, сводящийся к решению задач Коши в отдельных точках тела может быть обобщен на общий случай аппроксимаций искомых параметров в рамках общей схемы метода Бубнова-Галеркина, вытекая из нее как один из частных случаев. Этим определяются возможности метода Бубнова-Галеркина, как универсального метода решения начально-краевых задач теории ползучести и вырисовываются перспективы его применения в таких задачах. На основе изложенных методик выполнены расчеты дисков турбин, которые показали, что центральное отверстие существенно снижает прочность дисков.

**Литература:** 1. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 352 с. 2. Трухний А.Д. Стационарные паровые турбины. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 640 с.

**МЕТОД ПОДСИСТЕМ ДЛЯ АНАЛИТИЧЕСКОГО ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И СИНТЕЗА**

**Андреев Ю.М.**, канд. техн. наук, **Морачковский О.К.**, докт. техн. наук  
(г. Харьков, Украина)

*The application of subsystems method for the analytical dynamic analysis and synthesis of mechanical systems. The special system of computer algebra and way of indexing of expressions in the formulas utilized. The method is applied for spatially driving holonomic systems and nonholonomic many-body systems. The examples of the static and dynamic analysis of forces in members of beam model of the bridge under the subitaneously applied vertical load are submitted.*

**Введение.** Программное обеспечение современных САПР динамического анализа и синтеза машин и механизмов должны позволять достаточно простыми средствами моделировать широкий спектр механических процессов. Это достигается применением современных методик [4, 6, 8]. В полной мере реализовать их преимущества можно эффективнее всего с помощью систем компьютерной алгебры (СКА) – универсальных, таких как MATHCAD, MATLAB, или специальных [1, 2, 5, 9]. Такое решение позволяет передать ПК громоздкие аналитические преобразования и вычисления, выполнение сложных динамических расчетов в процессе анализа и синтеза машин. Разработка специальных СКА [1, 2], встроенных в программные пакеты, дает возможность объединить шаги формирования описания механической модели, диагностики исходных данных, получения математической модели, проведения аналитических и численных вычислений, компоновки выходных данных по результатам, архивации отчетов. Это повышает интеллектуальные свойства программ САПР. Специальная организация исходных данных в формульном виде допускает задание только необходимой для решения проблемы информации, что уменьшает ее объем и повышает эффективность расчетов. Под эффективностью здесь понимается не только реализация расчетов, но и относительная доступность исследователю к проведению сложных расчетов с контролем ошибок в исходных данных, что гарантирует высокую надежность получаемым результатам, сокращает затраты на пути от формулировки задач до получения результатов. Для дальнейшего повышения эффективности расчетов с применением ПК необходимо реализовать возможности для более формального описания механических моделей, используя инженерный и исследовательский опыт, накопленный в анализе и синтезе частных классов систем.

**Постановка проблемы.** Программный комплекс ПК «КИДИМ», в состав которого входит специальная СКА, создан на кафедре теоретической механики НТУ «ХПИ» с целью компьютерного моделирования статики, кинематики и динамики дискретных механических систем. Опыт использования ПК «КИДИМ» при решении задач анализа и синтеза механических систем подтверждает эффективность принятого подхода в целом, включая и то, что моделирование механических процессов основано на базе универсального принципа механики - общего вариационного уравнения динамики. Последний позволяет реализовать решения задач анализа и синтеза широкого класса механических систем при плоских и пространственных движениях, моделируя их дискретными системами твердых тел с (не)стационарными, (не)голономными и (не)удерживающими связями. С целью дальнейшего повышения

эффективности ПК «КИДИМ» рассмотрены вопросы, связанные с применением метода подсистем для решения задач анализа и синтеза сложных механических систем. В частности, реализованы методы декомпозиции сложных систем с регулярными подсистемами и разветвленных систем типа «дерева», решены вопросы усреднения переменных инерционных параметров за цикл работы агрегата, линеаризации с автоматическим приведением подсистем к квазиупругим системам для задач механических колебаний. В данной работе рассматривается применение метода подсистем для аналитического динамического анализа и синтеза механических систем, для решения задач неголономной механики в системах с регулярными подсистемами (на примере автопоезда с несколькими тележками), и разветвленных систем типа «дерева», на примерах робототехнической системы и стержневой системы модели моста.

**Аналитическое описание механических систем.** Общее уравнение динамики

$$\sum_{i=1}^n \left\{ W_{\vec{R}_i}^u T m_i \cdot \ddot{\vec{r}}_{C_i} + W_{\vec{M}_i}^u T \left( [\vec{J}_i] \cdot \ddot{\vec{\varepsilon}}_i^{(i)} + \vec{\omega}_i^{(i)} \times [\vec{J}_i] \cdot \vec{\omega}_i^{(i)} \right) \right\} - W_P^T P = 0, \quad (1)$$

программно образуется путем приведения к обобщенным координатам системы для каждого твердого тела: сил  $\vec{R}_i^u = -m_i \ddot{\vec{r}}_{C_i}$  и пар сил инерции  $\vec{M}_i^u = -([\vec{J}_i] \cdot \ddot{\vec{\varepsilon}}_i^{(i)} + \vec{\omega}_i^{(i)} \times [\vec{J}_i] \cdot \vec{\omega}_i^{(i)})$ , их суммирования по всем телам (первая сумма), активных сил и их суммирования (второе слагаемое). Алгоритм построения (1) основан на задании инерционных, силовых, диссипативных и упругих свойств дискретной механической системы, геометрических и физических характеристик активных сил и сил инерции [1, 2]:  $m_i$  – масса,  $\vec{r}_{C_i}$  – радиус-вектор центра масс,  $\vec{\omega}_i^{(i)}, \ddot{\vec{\varepsilon}}_i^{(i)}$  – векторы угловой скорости и углового ускорения,  $[\vec{J}_i^{(i)}]$  – тензор инерции для центра масс каждого твердого тела системы,  $n$  – общее количество тел,  $P = \{P_i\}$  – вектор составляющих активных сил и пар. Векторы угловой скорости углового ускорения, а также тензор инерции должны быть заданы в главной центральной системе координат (СК)  $i$ -го тела, радиус-вектор центра масс – в абсолютной, считающейся неподвижной.

Транспонированные матрицы преобразования координат, входящие в (1) представляют собой *структурные матрицы*: *геометрические* – сил инерции

$$W_{\vec{R}_i}^u = \left[ \frac{\partial \vec{r}_{C_i}}{\partial q} \right] \text{ и активных сил } W_P = \frac{\partial p}{\partial q}, \text{ и } \textit{дифференциальные}$$

$$\textit{инерции} \quad W_{\vec{M}_i}^u = \left[ \frac{\partial \vec{\omega}_i^{(i)}}{\partial \dot{q}} \right], \text{ которые аналитически определяются по явно заданным}$$

*структурам активных сил, сил и моментов сил инерции* – зависимостям от обобщенных координат (*геометрические структуры*) координат точек приложения активных сил, центров масс тел и зависимостям от обобщенных координат и обобщенных скоростей (*дифференциальные структуры*) угловых скоростей тел, соответственно,

$$\vec{r}_{C_i} = \vec{r}_{C_i}(q), \quad (2)$$

$$\rho = \rho(q), \quad (3)$$

$$\bar{\omega}_i^{(i)} = \bar{\omega}_i^{(i)}(q, \dot{q}). \quad (4)$$

Для нестационарных систем структуры (2)-(4) могут содержать явно время. Для неголономных систем или систем, описываемых в псевдокоординатах, структуры (2)-4) дополняются дифференциальными структурами, являющимися выражением зависимых обобщенных скоростей от независимых или псевдоскоростей

$$\dot{q} = G\dot{\pi}. \quad (5)$$

В этом случае структурные матрицы приведения к псевдокоординатам для дифференциальных структур (4) могут быть получены домножением соответствующих дифференциальных структурных матриц слева на производные обобщенных скоростей по псевдоскоростям, формируемым из (5), т. е. на матрицу  $G$ , либо прямым дифференцированием (4) по псевдоскоростям после подстановки туда формул (5). Структурные матрицы приведения к псевдокоординатам для геометрических структур (2), (3) могут быть также получены домножением соответствующих геометрических структурных матриц слева на матрицу  $G$ , либо прямым дифференцированием дифференциальных структур, полученных из (2), (3) взятием полной производной по времени, по псевдоскоростям после подстановки туда формул (5)

$$\begin{aligned} \tilde{W}_{\omega_i}^u &= \frac{\partial \bar{\omega}_i(q, \dot{\pi})}{\partial \dot{\pi}} = \frac{\partial \dot{q}^T}{\partial \dot{\pi}} \frac{\partial \bar{\omega}_i(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} = G^T \frac{\partial \bar{\omega}_i}{\partial \dot{q}} \\ \tilde{W}_{C_i}^u &= \frac{\partial \dot{q}^T}{\partial \dot{\pi}} \frac{\partial \bar{r}_{C_i}(q)}{\partial q} = G^T \frac{\partial \bar{r}_{C_i}(q)}{\partial q} = \frac{\partial \dot{r}_{C_i}(q, \dot{\pi})}{\partial \dot{\pi}}. \end{aligned}$$

Таким образом, для широкого класса механических систем, задание структур (2)-(4) и, при необходимости, (5), а также тензоров инерции  $\left[ \bar{J}_i^{(i)} \right]$  твердых тел и составляющих активных сил  $P$ , позволяет автоматически построить дифференциальные уравнения (1), а, значит, решить задачи кинематики, кинетостатики, статики и динамики [1, 2].

**Потенциальность силовых элементов.** Во многих случаях может оказаться необходимым, проверить, являются ли силы, действующие на механическую систему потенциальными. Если это так, то можно построить потенциальную энергию сил системы, проверить, устойчиво ли данное положение равновесия, найти эквивалентные квазиупругие элементы для потенциальных сил и т.д.

Предполагаем, что силовой элемент  $P_k = Pk$ ; потенциален. Тогда, по определению, характеристика элемента есть проекция силы (момента)  $\vec{P}$  на координату  $k$ , т.е. через потенциальную энергию она может быть определена

$$P_k = -\frac{\partial \Pi}{\partial k}.$$

Поэтому обобщенная сила по координате  $q_i$ , порождаемая этим силовым элементом,

$$Q_{ki} = -\frac{\partial \Pi}{\partial q_i} = -\frac{\partial \Pi}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial q_i} = P_k \frac{\partial k}{\partial q_i}.$$

Проверка потенциальности силового элемента заключается в проверке смешанных производных потенциальной энергии

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial q_i \partial q_j} = \frac{\partial^2 \Pi}{\partial q_j \partial q_i}.$$

Для силового элемента это означает,

$$\frac{\partial}{\partial q_j} \left( P_k \frac{\partial k}{\partial q_i} \right) = \frac{\partial}{\partial q_i} \left( P_k \frac{\partial k}{\partial q_j} \right).$$

Если это выполняется, тогда можно вычислить приведенные коэффициенты жесткости по каждой обобщенной координате, порождаемые этим силовым элементом

$$c_i = \frac{\partial^2 \Pi}{\partial q_i^2} = - \frac{\partial}{\partial q_i} \left( P_k \frac{\partial k}{\partial q_i} \right) = - \left( \frac{\partial P_k}{\partial q_i} \frac{\partial k}{\partial q_i} + P_k \frac{\partial^2 k}{\partial q_i^2} \right), \quad i=1,2,\dots,s.$$

То есть, вместо этого силового элемента можно ввести  $s$  (число степеней свободы системы) упругих элементов вида  $c \cdot q_i = c_i$ . Исходный силовой элемент после этого надо вывести из рассмотрения. Такая замена нужна при расчетах линейных свободных и вынужденных колебаний.

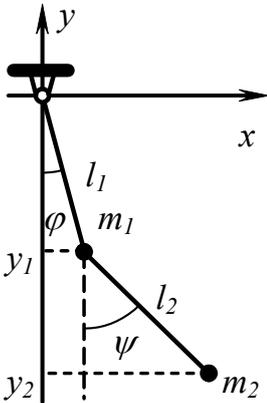


Рис. 1. Двойной математический маятник

Рассмотрим двойной математический маятник (рис. 1). Запишем силовые элементы сил тяжести.

$$P \cdot y_1 = -m_1 g; \quad P \cdot y_2 = -m_2 g; \quad y_1 = -l_1 \cos(\varphi); \quad y_2 = y_1 - l_2 \cos(\psi);$$

$$\text{Тогда} \quad \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( -m_1 g \frac{\partial y_1}{\partial \varphi} \right) = -m_1 g \cdot 0 = 0 = \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( -m_1 g \frac{\partial y_1}{\partial \varphi} \right)$$

$$\text{и} \quad \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( -m_2 g \frac{\partial y_2}{\partial \varphi} \right) = 0 = \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( -m_2 g \frac{\partial y_2}{\partial \varphi} \right).$$

Приведенные коэффициенты жесткости будут функциями обобщенных координат

$$c_{1\varphi} = -(-m_1 g l_1 \cos \varphi) = m_1 g l_1 \cos \varphi; \\ c_{2\varphi} = m_2 g l_2 \cos \varphi; \quad c_{2\psi} = m_2 g l_2 \cos \psi.$$

Если же  $y_1 = -l_1(1 - \varphi^2/2)$ ;  $y_2 = y_1 - l_2(1 - \psi^2/2)$ ; то коэффициенты жесткости  $c_{1\varphi} = m_1 g l_1$ ;  $c_{2\varphi} = m_2 g l_2$ ;  $c_{2\psi} = m_2 g l_2$  будут постоянными.

Универсальность описанного подхода не снимает во многих практически важных случаях сложности и громоздкости выражений (2)-(4). Поэтому актуальным является автоматизация более формального описания механических моделей и получения таких зависимостей программно.

**Метод подсистем.** В том случае, когда механическую модель можно представить как регулярную совокупность структурно одинаковых подсистем или в ней можно выделить части, являющиеся структурно повторяющимися, удобным будет описать одну часть, используя формулы с индексированными переменными. Указанные в исходных данных границы изменения индексов позволят программно сгенерировать описания других структурно подобных частей. Сформированные таким образом исходные данные образуют уже полное описание модели.

**Структуры пространственных систем твердых тел.** Каждое твердое тело механической системы также представляет собой подсистему. Поэтому представление системы совокупностью твердых тел является простейшим примером метода

подсистем. Согласно, [1, 2] задание системы твердых тел, имеющей структуру «дерева» списком объектов, называемых также «твердое тело», позволяет автоматизировать построение инерционных структур вида (2), (4). Каждый такой объект имеет название, ссылку на тело, в СК которого определяется данное, список последовательных смещений и поворотов СК от такого тела к данному, а также элементы тензора инерции в главной центральной СК тела. В качестве примера приведем описание кинематической структуры робота Станфордского университета [10] (см. рис.2) , имеющего 7 степеней свободы, из них 5 – вращательных и 2 - поступательных.

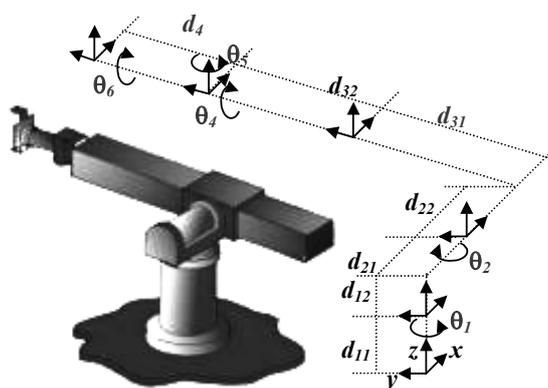


Рис. 2.

#Задание через твердые тела#

Колонна| $S_z(d_{11}), R_z(\theta_1)=J_z(J_{1z})$ ;

Плечо~Колонна| $S_z(d_{12}), S_x(d_{21}), R_x(\theta_2)=m_2, J_{2x}, J_{2z}, J_{2y}$ ;

Локоть~Плечо| $S_x(d_{22}), S_y(d_{31})=m_3, J_{3x}, J_{3z}, J_{3y}$ ;

Запястье~Локоть| $S_y(d_{32}), R_y(\theta_4), R_z(\theta_5), R_y(\theta_6)=m_4, J_{4z}, J_{4x}, J_{4y}$ ;

Схват~Запястье| $S_y(d_4)=m_5, J_{5x}, J_{5z}, J_{5y}$ ;

# Геометрические размеры #

$d_{11}=0.5; d_{12}=0.5; d_{21}=0.1; d_{22}=0.1; d_{32}=0.3; d_{41}=0.3$ ;

# Инерционные параметры #

$J_{1z}=5$ ;

$m_2=10; J_{2x}=1; J_{2y}=2; J_{2z}=3$ ;

$m_3=2; J_{3x}=0.5; J_{3y}=1; J_{3z}=1$ ;

$m_4=1; J_{4x}=0.1; J_{4y}=0.2; J_{4z}=0.3$ ;

$m_5=0.5; J_{5x}=0.05; J_{5y}=0.1; J_{5z}=0.3$ ;

# Обобщенные координаты –  $\theta_1, d_{31}, \theta_2, \theta_4, \theta_5, \theta_6, d_4$ ; #

Здесь ~ - разделитель между именем твердого тела и именем тела, в СК которого задается положение СК данного,  $S_i, R_i$  – соответственно, смещение по и поворот вокруг указанной индексом  $i$  оси на величину, записанную в скобках.

На рис. 3 приведена плоская стержневая модель моста [7], для которой надо найти статические и динамические усилия в стержнях для внезапно приложенной вертикальной нагрузки  $P=10m$  в узле 6. Обобщенными координатами можно выбрать декартовы координаты узлов 2-19 и абсциссу узла 20.

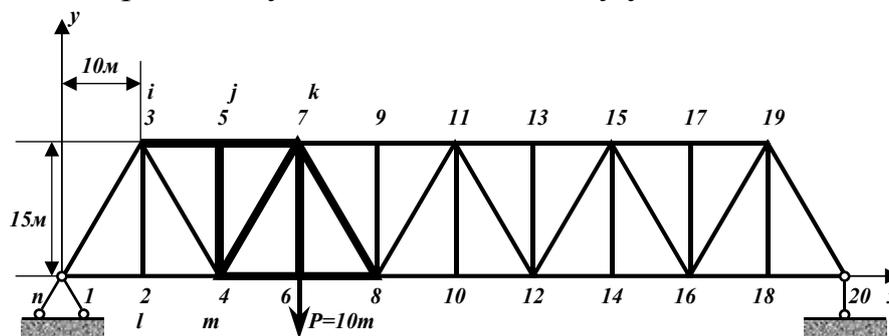


Рис. 3.

Вместо того, чтобы описывать все стержни конструкции, можно описать часть, выделенную на рис. 3 жирными линиями, размножить ее 3 раза и добавить узлы 1-4 и стержни 1-2, 2-4, 1-3, 2-3, 3-4. Традиционно для стержневых систем, приведем массы стержней к узлам

$$m_p=L_p*p/2; m_s=L_s*s/2; m_r=L_r*r/2; m_2=2*m_p+m_s; m_3=m_s+2*m_r;$$

$$m_{4l}=m_r+m_p; m_{4r}=m_s+m_p+m_r; m_N=m_r+m_p; m_7=m_p+2*m_r+m_s;$$

где длины стержней (в м)  $L_p=10$ ;  $L_s=15$ ;  $L_r=5*\sqrt{13}$ ; погонная масса (в кг/м)  $p=2$ ;  $s=0,48$ ;  $r=0,64$ ;

Тогда инерционные элементы постоянной части:

$$J.x_2 = m_2; J.y_2 = m_2; J.l.x_3 = m_3; J.l.y_3 = m_3; J.l.x_4 = m_{4l}; J.l.y_4 = m_{4l},$$

регулярной части:

$$Jr.x_i = m_p; Jr.y_i = m_p; Jr.x_l = m_{4r}; Jr.y_l = m_{4r}; J.x_j = m_2; J.y_j = m_2; J.x_m = m_2; J.y_m = m_2; J.l.x_k = m_7; J.l.y_k = m_7; J.l.x_n = m_N; J.l.y_n = m_N.$$

Внутреннее трение считается пропорциональным массам, поэтому для постоянной части:

$$D.y_2 = b_2; D.l.y_3 = b_3; D.l.y_4 = b_p; b=5; b_2 = b*m_2; b_3 = b*m_3,$$

для регулярной части:

$$D_r.y_i = b_p; D_r.y_l = b_{4r}; D.y_j = b_2; D.y_m = b_2; D.l.y_k = b_7; D.l.y_n = b_N; b_{4l} = b*m_{4l}; b_{4r} = b*m_{4r}; b_p = b*m_p; b_N = b*m_N; b_7 = b*m_7.$$

Силы упругости считаем пропорциональными удлинению стержней, модулю Юнга и площади поперечного сечения стержней. Поэтому для постоянной части:

$$\begin{aligned} C.dL_{1_2} &= C_p; C.dL_{2_4} = C_p; C.dL_{1_3} = C_r; C.dL_{3_4} = C_r; C.dL_{2_3} = C_s; \\ C_p &= EA_p/L_p; EA_p = 2.5e6; C_r = EA_r/L_r; EA_r = 1.6e6; C_s = EA_s/L_s; EA_s = 1.2e6; \\ dL_{1_2} &= \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} - L_p; dL_{2_4} = \sqrt{(x_2 - x_4)^2 + (y_2 - y_4)^2} - L_p; \\ dL_{1_3} &= \sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2} - L_r; dL_{3_4} = \sqrt{(x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2} - L_r; \\ dL_{2_3} &= \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2} - L_s; \end{aligned}$$

для регулярной части:

$$\begin{aligned} C.dL_{i_j} &= C_p; C.dL_{j_k} = C_p; C.dL_{j_l} = C_s; C.dL_{l_m} = C_p; C.dL_{m_n} = C_p; C.dL_{k_m} = C_s; C.dL_{k_l} = \\ &C_r; C.dL_{k_n} = C_r; \\ dL_{j_k} &= \sqrt{(x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2} - L_p; dL_{i_j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} - L_p; \\ dL_{l_m} &= \sqrt{(x_l - x_m)^2 + (y_l - y_m)^2} - L_p; \\ dL_{m_n} &= \sqrt{(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2} - L_p; dL_{j_l} = \sqrt{(x_j - x_l)^2 + (y_j - y_l)^2} - L_s; \\ dL_{k_m} &= \sqrt{(x_k - x_m)^2 + (y_k - y_m)^2} - L_s; \\ dL_{k_l} &= \sqrt{(x_k - x_l)^2 + (y_k - y_l)^2} - L_r; dL_{k_n} = \sqrt{(x_k - x_n)^2 + (y_k - y_n)^2} - L_r; \end{aligned}$$

Также индексируется часть начальных условий для регулярной части, например,

$$x_{j/0} = (j-1)*L_p/2; x_{k/0} = (k-1)*L_p/2; x_{m/0} = m*L_p/2; x_{n/0} = n*L_p/2;$$

Границы изменения индексов для  $N=20$ ;  $N_1=N-1$ ;  $N_2=N-2$ ;  $N_3=N-3$ ;  $N_4=N-4$ ;  $N_5=N-5$ ;

$$i[3, N_5, 4], j[5, N_3, 4], k[7, N_1, 4], l(4, N_4, 4), m(6, N_2, 4), n(8, N, 4), p(N_1, N_1, 1), q(N, N, 1);$$

Здесь *первое* значение в квадратных скобках соответствует нижней границе, второе - верхней, третье – величине шага изменения индекса. Все индексы при генерации формул изменяются синхронно в соответствии с нижней границей и шагом. При превышении одним из индексов в формуле своей верхней границы вся формула не генерируется.

На рис. 4 приведен график усилий в стержнях 6-7 (сплошная линия) и 7-4 (пунктир) (по рис. 3) за 10 с.

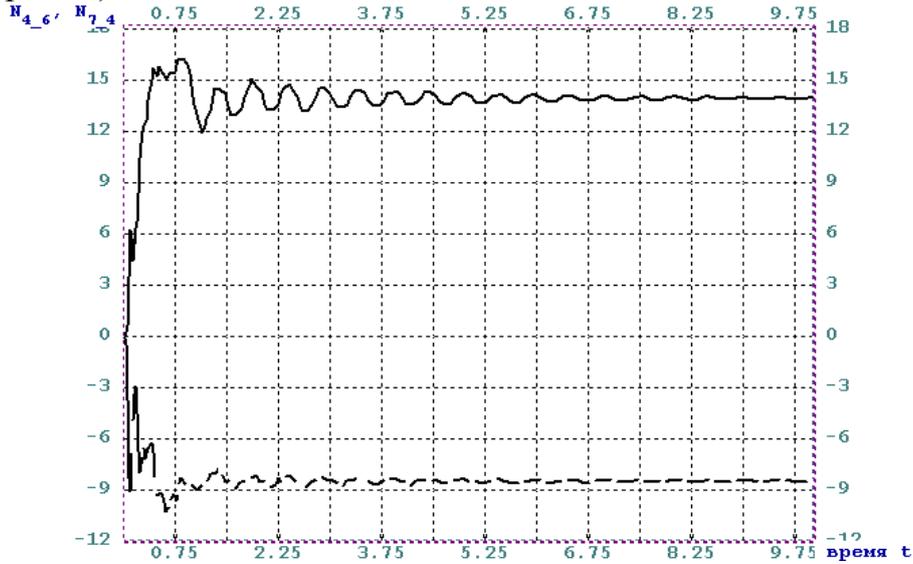


Рис. 4.

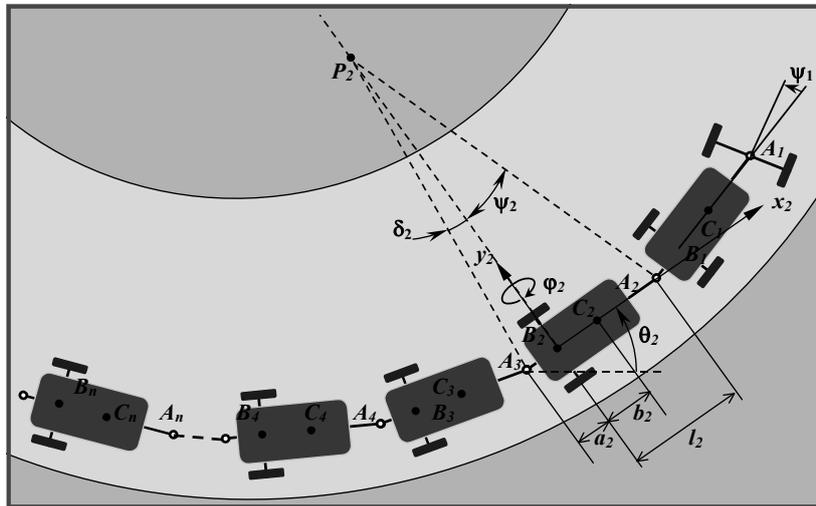


Рис. 5.

На рис. 5 приведена схема автопоезда, состоящего из четырехколесного тягача с передним приводом и нескольких двухколесных тележек [3]. Система неголономная. Легко видеть, что в ее составе есть регулярное звено – тележка, а также часть тягача без передней оси с колесами, которую также будем называть в дальнейшем тележкой. Поэтому здесь также возможно применение метода подсистем. Опишем это регулярное звено. Независимо от количества тележек  $n$  у системы при заданном законе управления (изменения во времени угла  $\psi(t)$ ) одна степень свободы [3]. За обобщенную координату возьмем дуговую координату  $t$ .  $A_1 - sA_1, k=1,2,\dots,n$ . Каждая тележка совершает плоскопараллельное движение, которое будем задавать поступательным движением вместе с центром масс по его траектории (дуговая координата -  $sC_k$ ) и вращательным движением вокруг центра масс (угловая скорость -  $\omega_k$ ). Тогда инерционность тележки в этих движениях опишется двумя инерционными элементами:  $J_k \cdot sC_k = m_k$ ;  $J_k \cdot \omega_k = J_k$ , где  $m_k$  – масса,  $J_k$  – момент инерции тележки. По условию, к центру оси каждой тележки приложена результирующая сила сопротивления, равная  $2000H$ . Поэтому зададим силовой элемент  $P \cdot sB_k = -2000$ ; На координаты введенных элементов наложены кинематические связи. Запишем их в виде (5)

$$sC_k' t = sA_k' t \sqrt{\cos^2 \psi_k + \beta_k \sin^2 \psi_k}; \quad \omega_k = sA_k' t \sin(\psi_k) l_k; \quad sB_k' t = sA_k' t \cos \psi_k$$

$$sA_j' t = sA_k' t \sqrt{\cos^2 \psi_k + \alpha_k \sin^2 \psi_k}; \quad \delta_k = \arctg(\alpha_k \operatorname{tg} \psi_k); \quad \psi_j = \theta_k - \theta_j - \delta_k; \quad \theta_k' t = \omega_k;$$

$$xA_k' t = sA_k' t \cos(\theta_k + \psi_k); \quad yA_k' t = sA_k' t \sin(\theta_k + \psi_k);$$

Сюда входят индексруемые параметры:  $m_k=2000\text{кг}$ ;  $J_k=2000\text{кг м}^2$ ;  $l_k=4\text{м}$ ;  $b_k=1,5\text{м}$ ;  $a_k=0,5\text{м}$ ;  $\alpha_k=a_k/l_k$ ;  $\beta_k=b_k/l_k$ .

Движущая сила – сила тяги, по условию задачи, приложена в центре передней оси тягача. Силовой элемент для нее будет:  $P.sA_1=F_{A_1}$ . Его характеристика - модуль силы тяги и закон поворота руля, точнее, закон поворота передней оси тягача вокруг вертикальной оси определяется неравенствами:

$$F_{A_1} = \begin{cases} sA_1' t < 16, & -125(sA_1' t)^2 + 2500sA_1' t + 12500 \\ sA_1' t < 20, & -5125sA_1' t + 102500 \\ sA_1' t \geq 20, & 0 \end{cases}, \quad \psi_1 = \begin{cases} t < t_0, & 0 \\ t < t_1, & 0,087 \sin[\omega(t-t_0)] \\ t \geq t_1, & 0 \end{cases}$$

Некоторые из начальных условий движения также индексруются:

$$xA_k(0) = -(l_k + a_k)(k-1); \quad sA_k(0) = 0; \quad sA_1' t(0) = 18,04; \quad sB_k(0) = 0; \quad xA_k(0) = xA_k(0); \quad yA_k(0) = 0;$$

$$sC_k(0) = 0; \quad \theta_k(0) = 0.$$

Наконец, границы изменения с шагом 1 (по умолчанию) двух индексов ( $k$  и  $j$ ):  $k[1,5]$ ,  $j[2,5]$ .

На рис. 6 показан совместный график изменения скоростей точек  $A_k$  тележек (номера точек растут для приведенных графиков сверху-вниз).

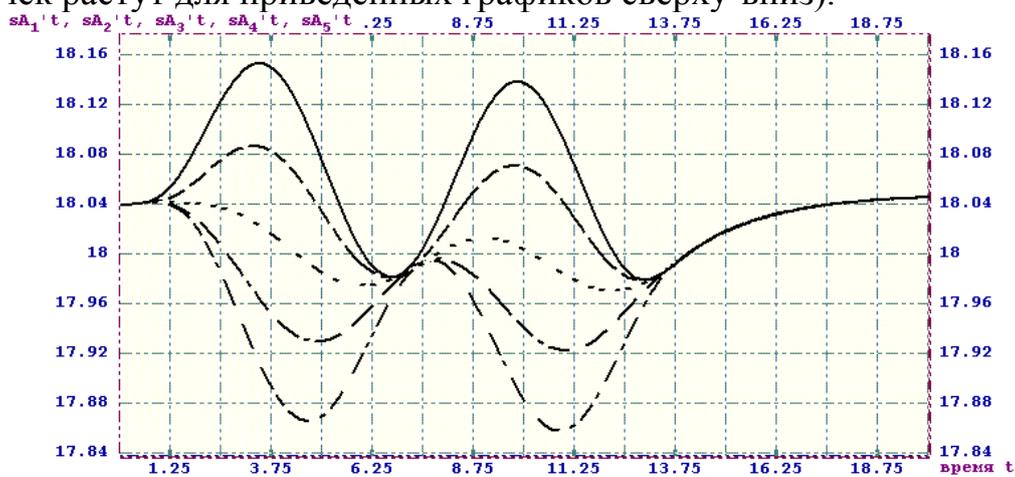


Рис. 6.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Универсальность предлагаемой системы компьютерного моделирования позволяет рассматривать задачи анализа и синтеза механики широкого класса систем с единых позиций, решая необходимый комплекс задач. Для систем с пространственным движением звеньев, неголономных систем и некоторых других подготовка исходных данных, несмотря на существенное упрощение, достигнутое в рамках предлагаемой системы относительно других методик, остается достаточно трудоемкой. В статье предлагается несколько приемов, облегчающих процесс подготовки данных. Это, прежде всего, реализация метода подсистем на аналитическом уровне, позволяющем по описанию части программно получить описание всей системы. Предложен способ автоматического определения потенциальности сил, приложенных к системе, построения линейных квазиупругих элементов для малых колебаний систем. Даны примеры при-

менения такого подхода – для квазиупругих систем, робототехнических систем, стержневых систем и неголономных систем типа автопоезда.

**Литература:** 1. Андреев Ю.М., Морачковский О.К. О динамике голономных систем твердых тел // Прикладная механика, 2005, том 41, №7. С. 130-138. 2. Андреев Ю.М., Морачковский О.К. Разработка САПР динамики машин на основе специальной системы компьютерной алгебры. Труды 11-й Международной конференции «Физические и компьютерные технологии». - ХНПК «ФЭД». - Харьков, 2005, С. 252-264. 3. Антонюк Е.Я., Матиясевич В.М. К теории движения сочлененного многозвенного автопоезда. //Прикл. механика, 2002, 38, №7. 4. Величенко В.В. Матрично-геометрические методы в механике с приложениями к задачам робототехники. – М., 1988. – 274 с. 5. Грошева М.В., Ефимов Г.В. О системах аналитических вычислений на ЭВМ //Пакеты прикладных программ. Аналитические преобразования. – М., 1988. – С.5-30. 6. Ермаков Б.Е. Метод постоянных скоростей в задачах механики. – М., 2000. – 152 с. 7. Зылев В.Б. Вычислительные методы в нелинейной механике конструкций. - М.: Науч.-изд. центр "Инженер", 1999. - 145 с. 8. Гаврилов С.В., Коноплев В.А. Компьютерные технологии исследования многозвенных мехатронных систем. - СПб.: Наука, 2004. - 191 с. 9. Погорелов Д.Ю. Методы компьютерного моделирования систем тел с большим числом степеней свободы. Выступление на семинаре Института космических исследований РАН "Механика, Управление и Информатика". – Брянск, 2001. – [Цит. 2005, 22 апреля]. – Доступный с <<http://www.iki.rssi.ru/seminar/20011025/seminar.ppt>>. 10. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. М.: Мир. 1989. 624 с.

**УДК 621.01**

## **СОСТАВЛЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ДАЛАМБЕРА- ЛАГРАНЖА**

**Морачковский О.К.**, докт. техн. наук, **Дружинин Е.И.**, канд. техн. наук,  
**Ромашов Ю.В.** канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)

*The questions connected to reception of generalized mathematical model of dynamic processes, proceeding in discrete systems of the various physical nature are considered(examined), on the basis of the general variational equation of mechanics .To show an opportunity of application of the specified model for drawing up of the ordinary differential equations of electric circuits with use of electromechanical analogies.*

**Постановка проблемы.** Проблема математического моделирования, связанная с необходимостью анализа динамических процессов в дискретных механических и электрических системах, так или иначе, сводятся к составлению и последующему решению систем обыкновенных дифференциальных уравнений. При рассмотрении сложных моделей, представляющих собой дискретные аналоги современных технических устройств, не только получение решений, но и составление дифференциальных уравнений, как правило, оказывается весьма сложной задачей, особенно, когда исследуются связанные механические и электрические системы. Задача разработки общих подходов компьютерного моделирования дискретных механических и электрических систем связана с прикладными задачами анализа электромеханических процессов в технических объектах, в частности, в электрическом транспорте. В связи с этим становится актуальным создание эффективных методов автоматизированного построения динамических уравнений, указанного класса систем, с помощью компьютерной алгебры.

**Анализ исследований и публикаций.** К настоящему времени имеется работы, посвященные математическому моделированию динамических процессов различной физической природы в дискретных системах [1,4]. В них, в том числе, рассматриваются вопросы составления дифференциальных уравнений на основе гид-

ромеханических и электромеханических аналогий. Предпочтение отдается аналогиям между электрической системой и другими физическими системами. Эти аналогии позволяют, по мнению авторов указанных работ, при получении математических моделей (ММ) не электрических систем, применять достаточно универсальные приемы построения ММ электрических систем, формализованные с использованием законов Кирхгофа и ориентированных графов. В [2] предлагается получать ММ электрических цепей с использованием уравнений Лагранжа. Однако, отсутствие детальных теоретических и прикладных исследований вопросов, связанных с компьютерным составлением дифференциальных уравнений рассматриваемого класса систем весьма затрудняет практическое получение математических моделей их динамического поведения.

**Цель и постановка задачи.** Целью данного исследования является определение наиболее общего подхода к автоматизированному составлению дифференциальных уравнений динамического состояния дискретных систем различной физической природы. В качестве такого подхода предлагается использовать метод составления указанных уравнений на основе принципа Даламбера-Лагранжа.

Согласно [3,5,6], модель дискретной механической системы представляется совокупностью её 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, упругих, диссипативных 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, который будет иметь вид

$$(J\ddot{\vec{\eta}} + D\dot{\vec{\theta}}) + (C\vec{\xi}, \delta\vec{\xi}) = (\vec{P}, \delta\vec{\psi}), \quad (5)$$

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

$$\frac{\partial \vec{f}_1(\vec{\zeta})}{\partial \vec{\zeta}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{11}}{\partial \zeta_1} & \dots & \frac{\partial f_{1i}}{\partial \zeta_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_{1i}}{\partial \zeta_1} & \dots & \frac{\partial f_{1i}}{\partial \zeta_n} \end{bmatrix} = S_1; \frac{\partial \vec{f}_2(\vec{\zeta})}{\partial \vec{\zeta}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{21}}{\partial \zeta_1} & \dots & \frac{\partial f_{21}}{\partial \zeta_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_{2i}}{\partial \zeta_1} & \dots & \frac{\partial f_{2i}}{\partial \zeta_n} \end{bmatrix} = S_2; \frac{\partial \vec{f}_3(\vec{\zeta})}{\partial \vec{\zeta}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{31}}{\partial \zeta_1} & \dots & \frac{\partial f_{31}}{\partial \zeta_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_{3i}}{\partial \zeta_1} & \dots & \frac{\partial f_{3i}}{\partial \zeta_n} \end{bmatrix} = S_3; \frac{\partial \vec{f}_4(\vec{\zeta})}{\partial \vec{\zeta}} = S_4,$$

запишем (5) в виде

$$(J\ddot{\eta}, S_1\delta\bar{\zeta}) + (D\dot{\theta}, S_2\delta\bar{\zeta}) + (C\bar{\xi}, S_3\delta\bar{\zeta}) = (\bar{P}, S_4\delta\bar{\zeta}) \quad (7)$$

Воспользовавшись свойством сопряженности матриц,  $s_1, s_2, s_3, s_4$  будем иметь

$$(S_1^T J\ddot{\eta}, \delta\bar{\zeta}) + (S_2^T D\dot{\theta}, \delta\bar{\zeta}) + (S_3^T C\bar{\xi}, \delta\bar{\zeta}) = (S_4^T \bar{P}, \delta\bar{\zeta}) \quad (8)$$

Для голономных систем вариации обобщенных координат  $\delta\bar{\zeta}$  - произвольны, следовательно, из (8) получим систему дифференциальных уравнений в векторно-матричной форме

$$S_1^T J\ddot{\eta} + S_2^T D\dot{\theta} + S_3^T C\bar{\xi} = S_4^T \bar{P}. \quad (9)$$

Заменим векторы координат векторными функциями, определяющими структуры

$$S_1^T \ddot{f}_1 + S_2^T D\dot{f}_2 + S_3^T C\bar{f}_3 = S_4^T \bar{P}. \quad (10)$$

Уравнение (10) является обобщенной математической моделью динамических процессов, имеющих место в дискретных голономных системах. Для широкого класса систем структуры  $\bar{f}_j(\bar{\zeta}) (j=\overline{1,4})$  являются постоянными и линейными. С учетом этого уравнение (10) примет вид:

$$S_1^T JS_1\bar{\zeta} + S_2^T DS_2\bar{\zeta} + S_3^T CS_3\bar{\zeta} = S_4^T \bar{P}, \quad (11)$$

где  $s_j (j=\overline{1,4})$  числовые структурные матрицы.

Уравнение (10) может быть применено для составления дифференциальных уравнений электрических цепей. Если цепи линейны, то используется уравнение (11).

В качестве примера рассмотрим составление уравнений электрической цепи, приведенной на рис. 1. Воспользуемся первым вариантом электромеханической аналогии, в соответствии с которым: напряжение соответствует силе; сила тока – скорости; сопротивление – вязкому трению; емкость – податливости; индуктивность – массе; заряд – перемещению. В качестве обобщенных координат выберем заряды в контурах схемы. Тогда матрицы значений инерционных, диссипативных и упругих элементов и компоненты вектора силовых элементов будут иметь вид:

$$J = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 \\ 0 & L_2 & 0 \\ 0 & 0 & L_3 \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_3} \end{bmatrix}; \bar{P} = \{e_1(t)\}. \quad (12)$$

Структурные матрицы (структуры) инерционных, диссипативных и упругих элементов, а также транспонированная структурная матрица силовых элементов будут такими:

$$S_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}; S_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}; S_3 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}; S_4^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

После подстановки (12)-(13) в (11) и выполнения операций имеем векторно-матричное уравнение:

$$\begin{bmatrix} L_1 + L_3 & 0 & -L_3 \\ 0 & L_2 & 0 \\ -L_3 & 0 & L_3 \end{bmatrix} \cdot \ddot{\vec{q}} + \begin{bmatrix} R_1 + R_2 + R_3 + R_4 & -R_2 & -R_4 \\ -R_2 & R_2 & 0 \\ -R_4 & 0 & R_4 \end{bmatrix} \cdot \dot{\vec{q}} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_3} & -\frac{1}{C_1} & -\frac{1}{C_3} \\ -\frac{1}{C_1} & \frac{1}{C_1} & 0 \\ -\frac{1}{C_3} & 0 & \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \end{bmatrix} \cdot \vec{q} = \begin{bmatrix} e_1(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

или окончательно, систему уравнений:

$$\begin{cases} (L_1 + L_3)\ddot{q}_1 - L_3\ddot{q}_3 + (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)\dot{q}_1 + \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_3}\right)q_1 - \frac{1}{C_1}q_2 - \frac{1}{C_3}q_3 = e_1(t) \\ L_2\ddot{q}_2 + R_2\dot{q}_2 - R_2\dot{q}_1 + \frac{1}{C_1}q_2 - \frac{1}{C_1}q_1 = 0 \\ L_3\ddot{q}_3 - L_3\ddot{q}_1 + R_4\dot{q}_3 - R_4\dot{q}_1 + \left(\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}\right)q_3 - \frac{1}{C_3}q_1 = 0 \end{cases} \quad (15)$$

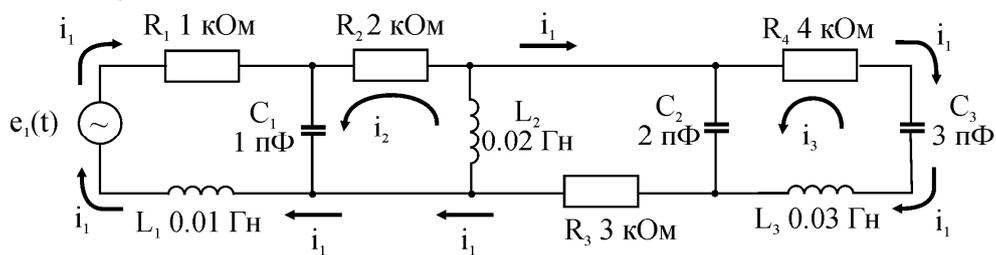


Рис. 1. Схема электрической цепи.

Изложенный подход к составлению уравнений реализован в программном комплексе «КИДИМ», в состав которого входит специальная система компьютерной алгебры, Комплекс создан на кафедре теоретической механики НТУ «ХПИ» для компьютерного моделирования задач динамики, кинематики и статики дискретных механических систем. В табл. 1 представлены собственные частоты рассмотренной электрической цепи, рассчитанные на «КИДИМе», а на рис. 2 и рис. 3 – амплитудно-частотные характеристики элементов системы.

Таблица 1

Номер собственной частоты	Значения собственных частот	
	Гц	рад/сек
1	336178.004091	2112268.695900
2	909467.889701	5714355.281920
3	2197619.398380	13808049.914673

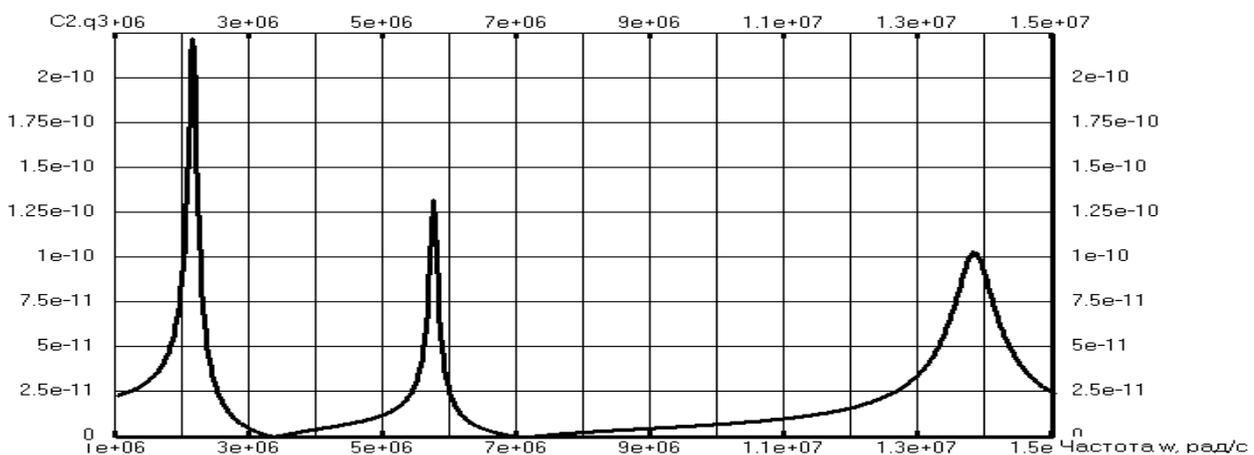


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика, определяемая на конденсаторе  $C_2$ .

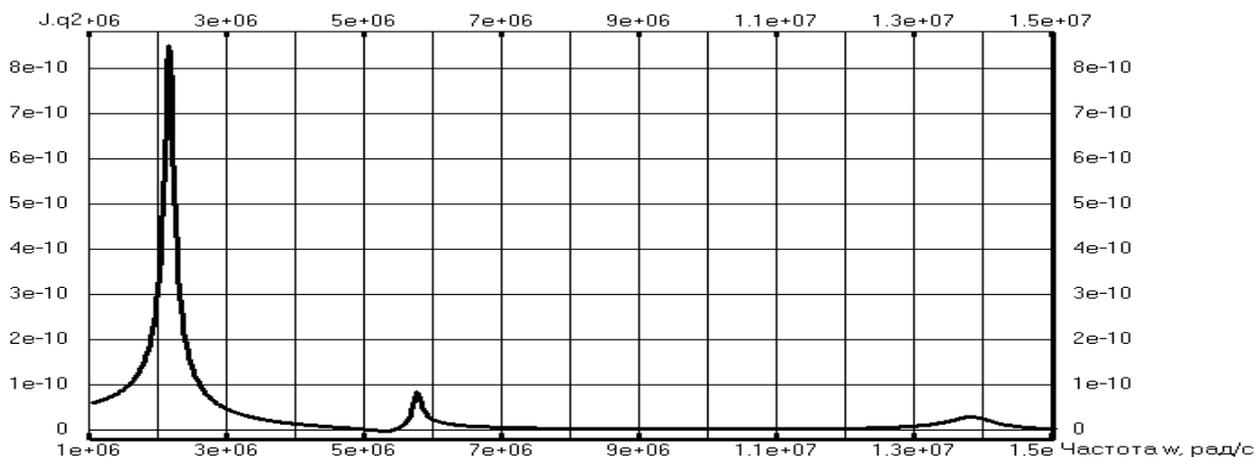


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика, определяемая на индуктивности  $L_3$ .

На вход электрической цепи подавался синусоидальный сигнал амплитудой 10 В.

**Выводы.** Показана универсальность предлагаемого подхода к моделированию динамических процессов в дискретных системах различной физической природы. Эффективность подхода демонстрируется на примере составления дифференциальных уравнений электрической цепи и получении ее частотного спектра и амплитудно-частотных характеристик отдельных элементов. В комплексе «КИДИМ» также реализована возможность получения временных характеристик элементов дискретных систем, которые могут представлять интерес в случае полигармонического возбуждения.

**Литература:** 1. Блекборн Дж., Ритхоф Г., Шерер Дж. Л. Гидравлические и пневматические силовые системы управления. – М.: ИЛ, 1962. – 616 с. 2. Гантмахер Ф.Р. Лекции по аналитической механике. – М.: Наука, 1966. – 300 с. 3. Дружинин Е.И., Штейнвольф Л.И. Динамические модели силовых цепей машин с гидрообъемными передачами. – В сб.: Теория механизмов и машин. – Харьков: Вища школа, 1984, вып. 36. – С. 95-102. 4. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003, – 496 с. 5. Митин В.Н., Штейнвольф Л.И. Структурные матрицы вибрационных систем. – В кн.: Динамика и прочность машин. – Харьков, 1973, вып. 17. С. 3-7. 6. Митин В.Н., Штейнвольф Л.И. Структуры дискретных механических моделей конструкций. – В кн.: Динамика и прочность машин. – Харьков, 1982, вып. 35. – С. 3-6.

### УДК 539.3

## ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ДЕТОНАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Воробьев Ю.С., докт. техн. наук, Чернобрывко М.В., канд. техн. наук,  
Евченко Н.Ю., Толлок Е.В. (г. Харьков, Украина)

*The compound design under act of an internal spherical wave of pressure is presented. The stressed deformation state and temperature condition taking into account of high-speed deformation and adiabatic temperature as a result of plastic deformation. The behavior of a design material is modeled in view of a high-speed reinforcement and a temperature loss of strength. The mathematical model was developed with the result of experimental data.*

Для реализации цели работы созданы математические модели и методы расчета напряженно-деформированного состояния. При оценке возможности разрушения или потери несущей способности элементов строительных сооружений и оборудования при воздействии на них ударно-волновых нагрузок выделяются элементы

этих конструкций, которые требуется рассмотреть в первую очередь. Создана база данных, которая позволяет для рассматриваемых элементов определить необходимые характеристики, статические и динамические свойства материалов. На базе известных методов [1-5] и данных экспериментальных исследований разработаны критерии оценки состояния рассматриваемых объектов после воздействия ударно-волновых нагрузок. Элементная база включает в себя следующие основные конструктивные элементы [1]:

1. Балки с различными граничными условиями (жесткая заделка, шарнирное опирание, свободный край и их комбинации). Для балок необходимо задать их длину  $L$  и размеры поперечного сечения или геометрические характеристики поперечного сечения: площадь  $F$ , моменты инерции  $I_x$ ,  $I_y$ , расстояние от нейтральной оси до наиболее удаленных волокон  $x_{max}$ ,  $y_{max}$  или моменты сопротивления. Для балок несимметричного сечения дополнительно задается расстояние между центром масс и центром изгиба  $x_s$ ,  $y_s$ , полярный момент инерции  $I_p$  и геометрическая жесткость на кручение  $I_d$ . Для балок несимметричного сечения при необходимости рассматривается их изгибно-крутильная деформация. Для каждой балки задается площадь поверхности, на которой действует ударно-волновая нагрузка и расстояние равнодействующих сил от центра изгиба  $x_p$ ,  $y_p$ .

2. Колонны отличаются от балок тем, что они могут нести статическую нагрузку в направлении оси и подвергаться действию осевой динамической нагрузки.

3. Рамы образуются соединением балок и колонн. Горизонтальные балки иногда именуется ригелями.

4. Пластины и плиты могут быть элементами перекрытий или стен. Для них геометрическими размерами служат размеры в плане  $a$ ,  $b$ , толщина  $h$  и размеры ребер или выступов. На краях пластин или их части могут реализоваться различные виды граничных условий.

5. Плиты, моделирующие элементы стен, могут иметь проемы для окон или дверей. При этом необходимо оговорить учет жесткости рам и дверей.

Все перечисленные элементы могут взаимодействовать между собой, повышая жесткость друг друга и передавая дополнительные нагрузки.

Оценка последствий воздействия ударно-волновых нагрузок осуществляется путем сопоставления результатов исследования с наиболее общими случаями:

1) Деформации в материале протекали в упругой зоне  $(\sigma_i)_{max} < (\sigma_d)$ . Элемент конструкции возвратился в исходное состояние и сооружение не получило необратимых повреждений.

2) Возникли ограниченные зоны пластичности, но перемещения не превысили допустимых пределов. После разгрузки сооружение в малых зонах пластичности происходит упрочнение материала (типа стали). Пригодность сооружения к дальнейшей эксплуатации определяется экспертной оценкой.

3) В процессе деформации развились значительные зоны пластичности. Возникли значительные остаточные напряжения. Сооружение не получило катастрофических повреждений, но нуждается в ремонте.

4) В отдельных элементах согласно критериям прочности произошло трещинообразование и разрушение, но основные несущие элементы не разрушены. Сооружение требует капитального ремонта или перестройки.

5) Произошло разрушение несущих элементов или потеря ими устойчивости.

Следует признать возможность разрушения всего сооружения.

Оценка последствий воздействия ударно-волновых нагрузок и конкретные свойства материалов могут уточняться в процессе работы и сопоставления результатов расчетов с известными.

Материалом конструкций могут служить строительная сталь, бетон и железобетон. Для каждого материала желательно иметь статические и динамические характеристики, которые сообщаются строительной организацией или организацией, эксплуатирующей сооружение. Для ряда строительных материалов (особенно для бетона) характеристики на растяжение и сжатие могут существенно отличаться.

При переходе в пластическую зону, необходимо учитывать новый модуль  $E_p$ . При скоростном деформировании происходит упрочнение материалов и изменение предела текучести. Для динамического предела текучести может быть предложена зависимость его от скорости деформации  $\dot{\varepsilon}$  в виде [4-7].

Для сложного напряженного состояния расчеты ведутся с определениями интенсивности напряжений и деформаций.

В результате расчетов определяются перемещения и напряжения, распределенные по континуальным элементам конструкции (по длине стержневых и площади пластиночных) и во времени. При этом определяются интенсивности напряжений  $\sigma_i$ , согласно величине которых устанавливается, находится материал в упругой или пластической зоне. Дальнейшие расчеты ведутся с учетом соответствующих характеристик материалов. Если материал находится в пластической зоне, то проверяется возможность его разрушения на основании известных критериев прочности. Наиболее приемлемым следует признать критерий Писаренко-Лебедева [4].

**Литература:** 1. Бейкер У., Кокс П. Взрывные явления. Оценка и их последствия. – М.: Мир, 1986 – (Книга 1 – 319 с., Книга 2 – 384 с.). 2. Трощенко В.Г., Лебедев А.А., Стрижало В.А., Степанов Г.В., Кривенюк В.В. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения. – Киев, 2000. – 570 с. 3. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – К.: Наук. думка, 1988. – 736 с. 4. Воробьев Ю.С., Колодяжный А.В., Севрюков В.И., Янютин Е.Г. Скоростное деформирование элементов конструкций. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с. 5. M.V. Chernobryvko, Y.S. Vorobiev Behavior of compound shell under detonation loading. The 8<sup>th</sup> Conf. «Shell Structures. Theory and Applications», Gdansk-Jurata (Poland), October 12-14, 2005.- P.299-302. 6. Воробьев Ю.С., Чернобрывко М.В., Меша Ю.В. Термоупругопластическое деформирование составной оболочки при детонационном нагружении. – Механіка та машинобудування. – 2005, № 1 - С. 75 - 82. 7. M.V. Chernobryvko, Y.S. Vorobiev Behavior of compound shell under detonation loading. The 8<sup>th</sup> Conf. «Shell Structures. Theory and Applications», Gdansk-Jurata (Poland), October 12-14, 2005. – P. 299-302.

### УДК 539.3

#### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ УДАРЕ**

**Воробьев Ю.С.**, докт. техн. наук, **Чернобрывко М.В.**, канд. техн. наук,  
**Ярышко А.В.**, **Степанченко Д.И.** (г. Харьков, Украина)

*A dynamic resilient-strained state of a cylindrical steel shell under the impact of a local shock load is researched. The research is conducted both experimentally and theoretically. The area of load application is modeled as a 3-D body. The material of shell is homogeneous and isotropic. The theoretical research is made using a finite-difference method with the implicit difference scheme.*

Экспериментально–теоретические исследования поведения конструктивных элементов при локальном ударе являются одним из основных средств определения прочностных свойств готовых конструкций, моделирования новых и оценки сохранения целостности конструктивных элементов при аварийных режимах эксплуатации. Цилиндрические оболочки могут служить моделью ряда элементов конструкций, подверженных ударным нагрузкам. В тоже время такие элементы позволяют провести достаточно подробные исследования их при локальном нагружении и сопоставить теоретические и экспериментальные результаты.

Локальные воздействия на цилиндрическую оболочку рассматриваются в ряде работ [1-3], где приведен анализ особенностей их нестационарного деформирования. Анализ этих работ показывает, что комплексные экспериментальные и численные исследования с учетом динамических свойств материалов могут выявить зоны развития интенсивных деформаций, возникновения зон пластических напряжений при увеличении масс и скоростей ударника и оценить области применимости различных математических моделей.

Экспериментальные исследования проводились для стальной цилиндрической оболочки с радиусом срединной поверхности  $R = 0,3$  м, толщиной  $h = 0,015$  м, длиной  $L = 1,5$  м. Материал оболочки имеет следующие характеристики:  $E = 0,71 \cdot 10^{11}$  Па,  $\nu = 0,3$ ,  $\rho = 78 \cdot 10^{-8}$  Н·с<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>.

Измерение деформации осуществляется малобазными тензодатчиками, расположенными на поверхности оболочки как вдоль по оси  $x$ , так и по окружности. Линии датчиков охватывают зону, на которую воздействует локальная нагрузка. Это дает возможность проследить изменение деформаций как во времени, так и по поверхности оболочки, в зависимости от расстояния до места нагружения. Сигнал с тензодатчика поступает на многоканальный широкополостный усилитель ШТС 8, а с него, через аналого-цифровой преобразователь, на персональный компьютер. Специальное программное обеспечение компьютера позволяют строить графики  $\varepsilon(t)$  для каждого датчика. Были проведены исследования по определению  $\varepsilon_k(t)$  для всех датчиков при различных значениях масс ударника и высоты их падения [4].

Численные исследования проводились на основе динамических уравнений в перемещениях в соответствии с теорией оболочки типа С.П. Тимошенко [2]. Деформации определялись следующим образом:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} - z \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right), \quad \varepsilon_\theta = \frac{\partial v}{r \partial \theta} - \frac{w}{r} + z \left( \frac{\partial^2 w}{r^2 \partial \theta^2} - \frac{\partial \psi}{r \partial \theta} \right), \quad (1)$$

$$\gamma_{x\theta} = \frac{\partial u}{r \partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial x} + z \left( \frac{\partial \varphi}{r \partial \theta} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) - 2z \frac{\partial^2 w}{r \partial \theta \partial x}, \quad (2)$$

где  $u$ ,  $w$  и  $v$  – компоненты перемещений в направлениях координатных осей  $x$ ,  $r$  и  $\theta$ ;  $\varphi$  и  $\psi$  – углы поворота нормали, относительно срединной поверхности оболочки в направлениях  $x$  и  $\theta$ ;  $z = \pm h/2$  – на поверхности оболочки.

В связи с особенностями нагружения задача не является осесимметричной. Уравнения Тимошенко позволяют описывать волновые процессы в оболочке и учитывать в первом приближении деформации сдвига. В зоне локального удара целесообразно перейти к трехмерной постановке задачи. Поэтому в ограниченной зоне пластичности задача решается в трехмерной постановке методом конечных разностей с использованием неявной схемы [5]. На каждом шаге проверяется величина интенсивности деформаций и скоростью деформаций. На основании зависимости

для динамических свойств материала оценивается динамический предел текучести  $\sigma_T^d$  материала, если  $\sigma_i$  превосходит динамический предел текучести, то переходят к решению задачи о скорости деформирования в пластической области [6].

В качестве примера приведено сравнение для изменения во времени расчетных и экспериментальных окружных деформаций в точке, расположенной на расстоянии 0,015 м от места нагружения (рис. 1).

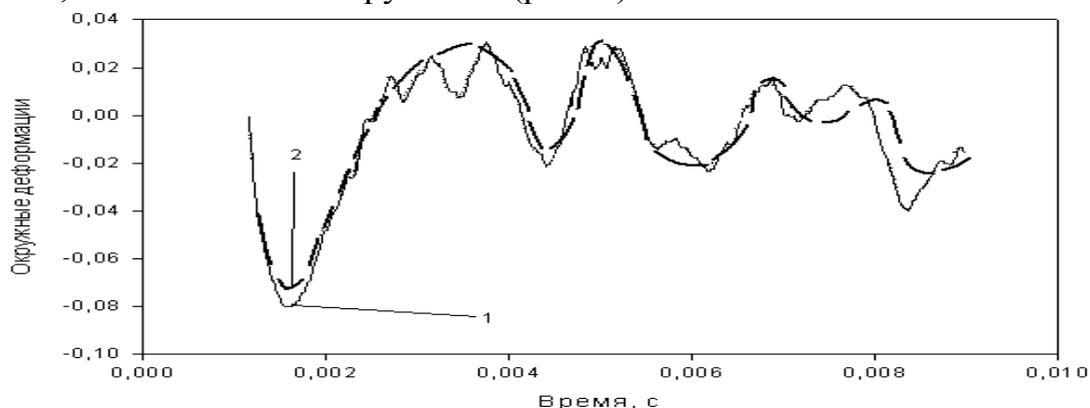


Рис. 1. Экспериментальные (1) и расчетные (2) окружные деформации.

При данном расположении датчиков вокруг зоны удара окружные деформации значительно преобладают над продольными. Поэтому численные расчеты велись для окружных деформаций. Хорошо виден волновой процесс. Численно он может быть рассмотрен только с помощью уравнений типа Тимошенко С.П., которые имеют волновой характер. Деформации и, следовательно, напряжения быстро затухают во времени.

**Литература:** 1. Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластин и оболочек. – М.: Наука, 1972. – 432 с. 2. Воробьев Ю.С., Колодяжный А.В., Севрюков В.И., Янютин Е.Г. Скоростное деформирование элементов конструкций. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с. 3. Воробьев Ю.С., Чернобрышко М.В., Крушка Л. Воздействие импульсных нагрузок на оболочечные элементы ГТД // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2003, Вип. № 40/5. – С. 64 - 67. 4. Ярышко А.В, Чернобрышко М.В., Воробьев Ю.С. Воздействие локальной ударной нагрузки на цилиндрическую оболочку // Автомобильный транспорт, Вып. 17, 2005. – С. 89-91. 5. Лук'яненко С.О. Адаптивні обчислювальні методи моделювання об'єктів з розподіленими параметрами. – К.: Політехніка, 2004. – 234 с. 6. M.V. Chernobryvko, Y.S. Vorobiev Behavior of compound shell under detonation loading. The 8<sup>th</sup> Conf. «Shell Structures. Theory and Applications», Gdansk-Jurata (Poland), October 12-14, 2005. – P.299-302.

**УДК 621.926**

### **АДАПТИВНАЯ К ВОЗМУЩЕНИЯМ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ ПО ПАРАМЕТРАМ АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА И ВИБРАЦИИ**

**Пермяков В.И.**, канд. техн. наук, **Ляшенко В.И.**, канд. техн. наук,  
**Рябушко А.В.** (г. Харьков, Украина)

*In the report the problem of synthesis of the adaptive to disturbance of system of automatic control by the crushing equipment is considered. The method of construction and structure of regulator of adapting to disturbance is led. The method of construction and structure of regulator of adapting to disturbance is led.*

Процессы измельчения занимают существенное место среди различных видов переработки сырья в разных областях промышленности. В качестве оборудования

для измельчения используются измельчительные агрегаты различных конструкций и принципов действия. Такие агрегаты являются крупными потребителями электроэнергии.

Несмотря на это процессы измельчения слабо автоматизированы. Это связано с отсутствием эффективных методов измерения основных параметров процесса измельчения. Таких как количество материала в измельчительном агрегате (так называемой загрузки), фракционного состава измельчаемого материала, его физико-химических свойств, производительности самих измельчителей, определения предаварийного состояния, при котором измельчительное оборудование настолько загружено размалываемым материалом, что это влечет за собой резкое снижение ее производительности и завал мельницы.

Многочисленные исследования показали, что все эти перечисленные характеристики зависят от множества параметров: физико-химического состава материала, характеристик пылесистемы, степени загрузки мельниц, характера подачи материала в мельницу и др. Эти перечисленные параметры относятся к возмущающим воздействиям. Задача проектирования систем управления процессами измельчения материалов эффективно решается применением различных методов адаптации к возмущениям.

Одним из наиболее эффективных может быть подход, связанный с представлением возмущений как выхода некоторой линейной системы, на вход которой подается последовательность импульсов случайной интенсивностью в случайные моменты времени. В этом случае проблема адаптации к возмущениям может быть сведена к синтезу наблюдателя возмущающего воздействия и проектированию так называемых регуляторов, приспособляющихся к возмущениям [1].

При проектировании системы управления будем использовать волновое представление возмущающих воздействий [2]. При этом у возмущений  $w(t)$  видны различные волновые формы – по крайней мере, на коротких интервалах времени. То есть возмущения волновой структуры могут быть математически представлены с помощью полудетерминированных аналитических выражений вида

$$w(t) = W[f_1(t), f_2(t), \dots, f_n(t); C_1, C_2, \dots, C_m], \quad (1)$$

где  $f_i(t)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  ( $n$ , как правило, конечное число) – экспериментально обоснованные функции, а  $C_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, m$  – неизвестные параметры, которые могут в некоторый момент скачком менять значение случайным кусочно-постоянным образом.

Чтобы полностью устранить влияние возмущений  $w(t)$  на поведение системы управляющее воздействие  $u(t)$  расщепляется на две части:

$$u(t) = u_d(t) + u_p(t). \quad (2)$$

На компоненту  $u_d(t)$  возлагается задача поглощения возмущений  $w(t)$ , а на компоненту  $u_p(t)$  – задача требуемого управления состоянием  $x(t)$  и (или) выходной переменной  $y(t)$ .

Учитывая (2), уравнения состояния и возмущения можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= \varphi_x X_k + \varphi_{xz} Z_k + \psi_{\epsilon} U_{pk} + \psi_{\epsilon} U_{dk} + \Omega_x \sigma_k, \\ Z_{k+1} &= \varphi_z Z_k + \Omega_z \sigma_k, \end{aligned} \quad (3)$$

в которых матрицы состояния, управления и возмущения являются элементами

блочных матриц, где

$$\Phi = \begin{bmatrix} \varphi_x & \varphi_{xz} \\ 0 & \varphi_z \end{bmatrix}, \psi = \begin{bmatrix} \psi_\varepsilon \\ 0 \end{bmatrix}, \Omega = \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_z \end{bmatrix}.$$

Здесь и далее аргумент  $t$  для простоты представления изложенного материала опускаем.

Из уравнения (3) следует, что для полного поглощения возмущений величина  $U_{dk}$  должна выбираться так, чтобы удовлетворялось уравнение

$$\psi_\varepsilon U_{dk} \equiv -\varphi_{xz} Z_k - \Omega_x \sigma_k \quad (4)$$

при всех возможных векторах возмущения  $Z_k$ . Принимая во внимание, что  $\sigma_k = 0$  на продолжительных интервалах времени, определим необходимое и достаточное условие существования управления, удовлетворявшего уравнению (2), в промежутках между импульсами  $\sigma_k$ , отличными от нуля:

$$\text{rank} [\psi_\varepsilon] = \text{rank} [\psi_\varepsilon | \varphi_{xz}]. \quad (5)$$

Далее, удовлетворение критерию полного поглощения (4) означает, что

$$\varphi_{xz} = \psi_\varepsilon^* \Gamma \quad (6)$$

для некоторой матрицы  $\Gamma$ . Общий вид решения уравнения (4) относительно управления  $U_d$ , поглощающего возмущения:

$$U_{dk} = -\Gamma Z_k, \quad (7)$$

где в качестве  $\Gamma$  может быть выбрана любая матрица из семейства

$$\Gamma = \psi_\varepsilon^+ * \varphi_{xz} + (E - \psi_\varepsilon^+ * \psi_\varepsilon) Q_\Gamma. \quad (8)$$

Здесь  $Q_\Gamma$  – абсолютно произвольная матрица действительных параметров. Символ "+" обозначает обобщенное обращение матрицы. Выбор матрицы  $Q_\Gamma$  должен обеспечивать минимальную норму  $\Gamma$ .

Уравнения (7) и (8) определяют регулятор, приспособляющийся к возмущениям, который обеспечивает полное поглощение возмущений, при этом на практике уравнение (7) можно реализовать в виде

$$U_d = -\Gamma \hat{Z}, \quad (9)$$

где  $Z$  вырабатывается комбинированным наблюдателем.

На базе разработанного виброакустического измерителя фракционного состава и способа непрерывного его контроля [3], а также полученной виброакустической модели измельчительного агрегата была синтезирована структура системы автоматического управления измельчительным оборудованием [4]. Управляемым параметром в данной системе является активная поверхность измельчаемого материала, а управляющим воздействием является изменение частоты вращения измельчительного агрегата.

Внедрение систем управления измельчительным оборудованием по параметрам шума и вибрации, построенных на базе принципов адаптации к возмущениям позволяет существенно интенсифицировать процесс измельчения.

**Литература:** 1. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах / Под ред. К.Т. Леондеса. – М.: Мир, 1980. – 408 с. 2. Рябушко А.В., Пермяков В.И., Журавлев Ю.В. Математическое моделирование возмущений волновой структуры // Материалы 10-й Международной конференции по автоматическому управлению «Автоматика-2003», г. Севастополь, 15-19 сентября 2003 г.: в 3-х т. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2003. – Т.1. – С.86-88. 3. Рябушко А.В., Пермяков В.И., Донец А.В., Кулаенко О.А. Аппаратно-программный комплекс виброакустических измерений измельчительных агрегатов. // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТБ

АБУ, 2000. – Вип.15. – С.137-140. 4. Невкрытый А.Ю., Кулаенко О.А., Рябушко А.В., Пермяков В.И. Управление измельчительными агрегатами по виброакустическому сигналу // Материалы 12-й Международной конференции по автоматическому управлению «Автоматика-2005», г. Харьков, 30 мая–3 июня 2005 г.: в 3-х т. – Харьков: Изд-во НТУ «ХПИ», 2005. – Т.2. – С.48-50.

**УДК 621.926**

## **АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ АКУСТИЧЕСКИХ И ВИБРАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ В ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ**

**Пермяков В.И.**, канд. техн. наук, **Ляшенко В.И.**, канд. техн. наук,  
**Невкрытый А.Ю.** (г. Харьков, Украина)

*It is considered experimentally - the statistical approach to reconstruction of physical technological fields on final number of measurements. The considered problem of definition of necessary number of points for measurements, and also a problem of their rational choice in technological volume.*

Технологические процессы производства строительных материалов являются достаточно энергоемкими. Существует необходимость снижать энергозатраты. Автоматизация режимов работы мельницы позволяет значительно увеличить КПД оборудования. На практике используются системы автоматического управления на основе акустических и вибрационных датчиков, поскольку виброакустический сигнал несет в себе информацию о режиме работы мельницы. Поэтому актуальной представляется проблема размещения датчиков, а также определения их количества, необходимого для эффективной и надежной работы системы.

Датчики измеряют вибрационное и акустическое поле в конечном числе точек. Задача состоит в оценке вероятностных характеристик вибрационных и акустических полей на основе выборочных данных. Возникает также вопрос о количестве датчиков, необходимом для получения достаточной информации о поле, и об их рациональном размещении в технологическом объеме. Статистический подход к исследованиям пространственно – случайных полей требует частой расстановки датчиков.

Рассмотрим метод организации вибрационных и акустических измерений в объектах со случайными вибрационными полями используя разложение в ряды по некоторым базисным функциям, выбираемых с учетом конструкции технологических объектов и действующих на них воздействий.

Пусть пространственно – скалярное вибрационное поле, задано в некоторой области  $V \subset R^m$  ( $m=1,2,3$ ) и описывается скалярной функцией  $A(\vec{x}, \omega)$  векторного пространственного аргумента  $\vec{x}$  и частоты  $\omega$ . В области  $V$  выберем  $n$  точек с координатами  $\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_n$ . Измеряя в этих точках реализации вибрационного поля, найдем оценки математических ожиданий и взаимных моментов для этих точек поля:

$$M[A(\vec{x}_j, \omega)], M[A(\vec{x}_j, \omega) \cdot A(\vec{x}_k, \omega')].$$

Задача состоит в том, чтобы указать число датчиков  $n$  и их размещение в области  $V$ , необходимые для оценки математического ожидания и взаимных моментов поля.

Реконструкция вибрационного и акустического поля по измерениям в отдельных его точках – математически некорректная в силу континуальности самого поля, и дискретности измерений с другой. В приближенной постановке эту задачу можно

сформулировать корректно, описывая поле при помощи конечного числа параметров, используя разложение в ряд по некоторой системе детерминированных базисных функций  $\varphi_\alpha(\bar{x})$ , которую необходимо выбирать так, чтобы почти любая реализация  $A(\bar{x}, \omega)$  могла быть аппроксимирована при помощи ряда:

$$A(\bar{x}, \omega) = \sum_{\alpha} Q_{\alpha}(\omega) \varphi_{\alpha}(\bar{x}), \quad (1)$$

где  $Q_{\alpha}(\omega)$  – случайная функция частоты.

Получить общее выражение для математического ожидания и корреляционной функции поля  $A(\bar{x}, \omega)$ :

$$M[A(\bar{x}, \omega)] = \sum_{\alpha} M[Q_{\alpha}(\omega)] \varphi_{\alpha}(\bar{x}), \quad (2)$$

Пологая в соотношении (2)  $\bar{x} = \bar{x}_j$  и удерживая  $n$  членов ряда, получим относительно математических ожиданий систему уравнений с коэффициентами  $a_{j\alpha} = \varphi_{\alpha}(\bar{x}_j)$ , образующими матрицу  $A$ , размерность  $n \times n$ , аналогичную матрице Вандермонда в теории интерполирования. Если определитель матрицы  $A$  отличен от нуля, то из системы уравнений можно найти математические ожидания. Частоту  $\omega$  при этом будем трактовать как параметр. Подстановка их в (2) позволяет вычислить математическое ожидание вибрационного поля. Отсюда следует что, требуемое число датчиков равно числу членов ряда (1), которое необходимо для удовлетворительного приближения вибрационного поля  $A(\bar{x}, \omega)$ . Аналогично можно получить систему уравнений для реконструкции корреляционной функции поля.

Минимальное число требуемых датчиков равно числу членов ряда, которые необходимы для аппроксимации исследуемого вибрационного поля с заданной точностью.

Определители соответствующих уравнений должны быть отличны от нуля. Заметим, что определитель  $N$ -й кронекеровской степени матрицы  $A$  размерностью  $n \times n$  выражается через определитель этой матрицы следующим образом:

$$\det A^{[N]} = (\det A)^{Nn^{N-1}}. \quad (3)$$

Поэтому достаточным является условие:

$$\det A \neq 0. \quad (4)$$

Матрицы уравнений должны быть достаточно хорошо обусловлены. Тогда малые погрешности при измерении статистических характеристик вибрационного поля в отдельных точках не будут приводить к большим ошибкам при реконструкции поля в целом.

Требование, чтобы определитель матрицы  $A$  был достаточно далек от нуля, приводит к критерию для расстановки датчиков:

$$|\det A| \rightarrow \max_{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n}. \quad (5)$$

Здесь экстремум целевой функции ищется при определенных конструктивных ограничениях, накладываемых на координаты  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$ .

Для определения величины обусловленности матрицы коэффициентов системы уравнений разложения в ряд предлагается использовать определитель Грама. Для этого был разработан рекуррентный алгоритм.

Характерная особенность алгоритма заключается в том, что одновременно с вычислением определителя Грама находятся коэффициенты линейной комбинации

векторов  $\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_{k-1}$  для вектора  $\bar{x}_k$ , если  $\det \Gamma_k = 0$ .

Критерий обусловленности корреляционной матрицы можно сформулировать в терминах чисел обусловленности. В случае их распространения на многомерный случай корреляционная матрица может быть в целом хорошо обусловлена, однако между отдельными группами датчиков будет иметь место значительная корреляция. В дальнейшем аргумент у матрицы  $K(\omega, \omega')$  не выписываем, принимая, что оптимизация размещения датчиков производится при некоторых фиксированных значениях аргументов. Образует из элементов матрицы  $K$  главные подматрицы  $K_{jk}$ , где индексы равны номерам вычеркиваемых строк и столбцов. Общее число главных подматриц у матрицы порядка  $n$  равно  $2^n - n - 2$ . Обобщенные числа обусловленности равны максимальным значениям на множестве чисел обусловленности данной матрицы и всех главных подматриц:

$$\xi(K) = \max \{ \eta(K), \eta(K_1), \dots, \eta(K_{12\dots(n-2)}) \}. \quad (6)$$

В качестве критерия наилучшего размещения датчиков возьмем условие:

$$\xi(K) \rightarrow \min_{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n}.$$

При  $n=2$  этот критерий совпадает с требованием наилучшей обусловленности в обычном смысле. При  $n>2$  критерий должен включать в себя также требования минимума попарной корреляции между показаниями всех датчиков, а также некоторые требования, сводящие к минимуму множественную корреляцию.

**Литература:** 1. Божко А.Е., Пермяков В.И. Рекуррентный алгоритм определения наблюдаемости и управляемости динамических систем. – Вест. Харьк. политех. ин-та “Автоматика и приборостроение”. – Харьков, 1987, № 249, Вып. 13. – С. 59-62. 2. Мочанов И.Н. Машинные методы решения прикладных задач. – К.: Наукова думка, 1987. 3. Пешель М. Моделирование сигналов и систем. – М.: Мир, 1981. – С. 139-156.

УДК 539.3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНОЙ СИЛЫ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ УДАРЕ ПО МНОГОСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЕ

Угримов С.В., канд. техн. наук, Шелудько Г.А., Шупиков А.Н., докт. техн. наук  
(г. Харьков, Украина)

*In work the problem of identification of the force acting on a multilayer plate at low-velocity impact by a rigid body on known strains in arbitrary point of plate is considered. The behavior of a plate is described with the framework of generalized theory in which basis expansion of the displacement vector components in power series on transversal coordinate. The hybrid search method of optimization is used for the solution of the inverse problem. The identification results of force at impact by a full-sphere on single- and multilayer plates are presented.*

Одной из основных проблем при анализе прочности разнообразных элементов машиностроительных конструкций является неполная исходная информация о нагрузках, действующих на них в процессе эксплуатации. Неизвестные нагрузки могут быть определены при решении обратных задач на основании некоторых известных из эксперимента данных [1–4]. Существует несколько типов обратных задач теории упругости: определение поверхностных нагрузок; определение свойств материала; установление математической модели объекта; идентификация дефектов

и другие. Предлагаемая работа посвящена определению поверхностного импульсного нагружения, действующего на однородные и многослойные пластины при ударе твердым телом (задача определения поверхностных нагрузок) по известным из эксперимента деформациям ее произвольной точки.

Поведение многослойной пластины описывается уравнениями обобщенной теории, позволяющей описывать процесс нестационарного деформирования пластины с высокой степенью точности [5, 6], в основе которой лежат гипотезы

$$u^i(x, y, z, t) = u^0 + \sum_{k=1}^K \left[ \sum_{j=1}^{i-1} h_j^k u^{jk} + (z - \delta_{i-1})^k u^{ik} \right],$$

$$v^i(x, y, z, t) = v^0 + \sum_{k=1}^K \left[ \sum_{j=1}^{i-1} h_j^k v^{jk} + (z - \delta_{i-1})^k v^{ik} \right],$$

$$w^i(x, y, z, t) = w^0 + \sum_{\ell=1}^L \left[ \sum_{j=1}^{i-1} h_j^\ell w^{j\ell} + (z - \delta_{i-1})^\ell w^{i\ell} \right],$$

$$h_j^k = (h_j)^k; \quad \delta_i = \sum_{j=1}^i h_j; \quad \delta_{i-1} \leq z \leq \delta_i; \quad i = \overline{1, I},$$

где  $u^i, v^i, w^i$  – перемещения точки  $i$ -го слоя в направлении координатных осей  $Ox, Oy, Oz$ ;  $u^0, v^0, w^0, u^{ik}, v^{ik}, w^{i\ell}$  – коэффициенты разложений, представляющие собой функции аргументов  $x, y, t$ ;  $K, L$  – максимальные степени поперечной координаты для плоскостных и нормального перемещений соответственно, которые выбираются в зависимости от требуемой точности;  $h_i$  – толщина  $i$ -го слоя;  $I$  – количество слоев в пакете.

Система уравнений, описывающая поведение многослойной пластины при действии импульсного нагружения, получена из вариационного принципа Остроградского-Гамильтона. Количество уравнений в системе зависит от числа слоев в пакете и равно  $(2K + L)I$ . Искомые функции  $u^0, v^0, w^0, u^{ik}, v^{ik}, w^{i\ell}$  и внешние нагрузки разлагаются в тригонометрические ряды по функциям, удовлетворяющим граничным условиям [5, 6]. В результате задача о нестационарных колебаниях многослойной пластины сводится к интегрированию системы обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, решение которой производится численно [6].

Определение параметров импульсной нагрузки, действующей на пластину при ударе твердым телом, осуществляется методами нелинейного программирования. Предполагается, что при ударе твердым телом контактное давление распределено по круглой площадке по эллипсоидальному закону. Известны плоскостные деформации произвольной точки пластины для  $N$  моментов времени. Требуется определить величину силы и размеры площадки контакта при ударе.

Варьируемыми параметрами являются искомые значения силы  $\{P_j\}$  и размеры области контакта  $\{a_j\}$  ( $j = \overline{1, N}$ ). Ограничения представлены выражениями

$G_j = P_j \geq 0$ ,  $G_{j+N} = a_j \leq A/2$ . В качестве функции цели  $F(H)$  выбирается функция

$$F = F(H) = \sum_{j=1}^N \left\{ \gamma \cdot (\varepsilon_{xj} - \tilde{\varepsilon}_{xj})^2 + (1 - \gamma) \cdot (\varepsilon_{yj} - \tilde{\varepsilon}_{yj})^2 \right\},$$

где  $\gamma$  – весовой коэффициент;  $\tilde{\varepsilon}_{xj} = \tilde{\varepsilon}_{xj}(P_1, \dots, P_j, a_1, \dots, a_j)$  – деформации, которые зависят от варьируемых значений силы  $P_j$  и размеров области контакта  $a_j$ ;  $\varepsilon_{xj}$ ,  $\varepsilon_{yj}$  – экспериментально полученные значения деформаций.

Для решения используется эффективный гибридный поисковый метод оптимизации с адаптивным управлением вычислительным процессом [6, 7].

В основе используемого метода лежит идея гибридизации, заключающаяся в том, что на заданном наборе поисковых методов-гибридентов, каждый из которых эффективно решает свой узкий класс задач, организуется новый метод, который при изменении ситуации поиска, благодаря адаптивному управлению, однозначно вводит в процесс поиска один или несколько гибридентов из принятого набора, наилучшим образом решающих задачу в данной ситуации.

Целью адаптивного управления является повышение качества и надежности, а также ускорение процесса решения задачи оптимизации.

Выполнена серия численных экспериментов по идентификации параметров силы при ударе на основе экспериментальных данных. Результаты расчета сопоставляются с данными, полученными при решении прямой задачи об ударе шаром по многослойной пластине [6].

**Литература:** 1. Задачи импульсного деформирования элементов конструкций / Е.Г. Янютин, И.В. Янчевский, А.В. Воропай, А.С. Шарапата. – Харьков: ХНАДУ, 2004. – 392 с. 2. Ching-Shih Yen. On the inverse problem of rectangular plates subjected to elastic impact/ Ching-Shih Yen, Enboa Wu. Part 1. Method Development and numerical verification // J. of Appl. Mechanics. Trans. ASME. – 1995. – Vol. 62. – P. 692–698. 3. J. D’Cruz . Determining a force acting on a plate – an inverse problem / J. D’Cruz, J. D.C. Crisp, T. G. Ryall // AIAA. – 1990. – Vol. 29, N. 3. – P. 464–470. 4. James F. Doyle. Determining the contact force during the transverse impact of plates// Experimental mechanics.–1987. – Vol. 27, N. 1.–P. 68-72. 5. Ugrimov S.V. Generalized theory of multilayer plates // Int. J. Solids Structures.– 2002. – Vol. 39, N. 4. – P. 819 – 839. 6. Нестационарные колебания многослойных пластин и оболочек и их оптимизация / А.Н. Шупиков, Я.П. Бузько, Н.В. Сметанкина, С.В. Уgrimov – Харьков: ХНЭУ, 2004. – 252 с. 7. Кохманюк С.С. Нестационарное деформирование элементов конструкций и их оптимизация / С.С. Кохманюк, А.С. Дмитриев, Г.А. Шелудько, А.Н. Шупиков, Л.Г. Романенко. – К.: Наук. думка, 1984. – 187 с.

**УДК 681.3**

### **ВЫЧИСЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ $\exp(x)$ И $\exp(-x)$ МЕТОДОМ $\Delta$ -ПРИБЛИЖЕНИЙ**

**Новиков С.Г.**, канд.техн.наук, **Жилина К.В.**, канд.техн.наук,  
**Тютюнов Д.Н.**, **Евдокимов А.Н.** (г. Курск, Россия)

*In work function evaluation  $\exp(x)$  and  $\exp(-x)$  by a method  $\Delta$  - is made.*

Существует множество методов вычисления экспонент для задач практики и в научных исследованиях. В последнее время наибольшее распространение получил

метод «цифра за цифрой» (модифицированные варианты работ Волдера и Меджиса). Основным алгоритмом метода Волдера является набор итерационных зависимостей. Между тем лаконичность и экономичность итерационных преобразований неизбежно приводит к неоправданно большим временным затратам на вычисление функций. Этот недостаток авторы известных работ пытаются устранить путем применения комбинированных методов обработки информации и распараллеливания алгоритмов уточнения функций.

Для ускорения процесса вычислений порождающих функций применим метод распараллеливания определения  $\exp(x)$  и  $\exp(-x)$ .

Задавая точность вычисления  $\varepsilon = 10^{-8}$ , сформируем таблицу значений  $M = 10^8$ . В ней достаточно разместить наборы значений мантиссы аргумента  $x$  фиксированной длины  $N_1 = \frac{9}{\lg 2} \approx 29,9$  бит и соответствующее количество фиксированных значений вычисляемых функций. Однако, если предположить, что в таблице хранятся только значения мантиссы, можно установить, что для этого понадобится

$$N = \frac{M \cdot N_1}{8 \cdot 1024^2} = \frac{10^8 \cdot 9}{8 \cdot 1024^2 \cdot \lg 2} \approx 356,4 \text{ Мбайт} \quad (1)$$

информации с учетом девятой дополнительной цифры в ячейке. По этой причине использование стандартных постоянных запоминающих устройств (ПЗУ) для хранения значений функций в таком представлении проблематично при аппаратной поддержке реализующих алгоритмов.

Для ликвидации возникшей проблемы достаточно использовать представление экспонент в виде степенных рядов (2) и (3):

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \dots + \frac{x^n}{n!} + \dots \quad (2)$$

$$e^{-x} = 1 - \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \dots + (-1)^n \frac{x^n}{n!} + \dots \quad (3)$$

Область сходимости рядов (2) и (3)  $D \in R$ .

Как уже отмечалось, что экспоненты  $\exp(x)$  и  $\exp(-x)$  можно объединить в одну функцию  $\exp(|x|) = e^{|x|}$  и представить в виде (4):

$$e^{|x|} = \begin{cases} e^x, & x \geq 0 \\ e^{-x}, & x < 0 \end{cases} \quad (4)$$

т.е. функции  $\exp(x)$  и  $\exp(-x)$  достаточно заменить четной функцией  $\exp(|x|)$ .

Рассмотрим возможность эквивалентной замены экспонент  $\exp(x)$ ,  $\exp(-x)$  на линейные выражения  $1 + x$ ,  $1 - x$  соответственно. Для этого рассмотрим остаточный член  $R_n(x)$  ряда (2)

$$R_n(x) = f(x) - S_n(x), \quad (5)$$

где  $f(x)$  определяется формулой (2);  $S_n(x)$  – частичная сумма ряда (2), т.е.

$$S_n(x) = \sum_{n=0}^n \frac{x^n}{n!} \quad (6)$$

Для удобства вычислений достаточно сделать эквивалентную замену экспоненты  $f(x)$  на линейную функцию при  $n=1$ .

Граничное значение аргумента  $x$  при эквивалентном переходе определяется из условия:

$$R_n(x) \leq \varepsilon. \quad (7)$$

Остаток ряда (2) будем оценивать по формуле Лагранжа:

$$R_n(x) = \frac{e^\theta x^{n+1}}{(n+1)!}. \quad (8)$$

где  $\theta = const, 0 < \theta < 1$ .

Учитывая условия (7) и (8), при  $n=1$ , и выбрав наихудший для оценки погрешности вариант  $\theta=1$ , имеем:

$$\frac{ex^2}{2!} \leq \varepsilon, \quad (9)$$

т.е. 
$$-\sqrt{\frac{2\varepsilon}{e}} \leq x \leq \sqrt{\frac{2\varepsilon}{e}} \quad (10)$$

или 
$$-0,85776388 \cdot 10^{-5} \leq x \leq 0,85776388 \cdot 10^{-5} \quad (11)$$

В итоге получим

$$|x| \leq 0,85776388 \cdot 10^{-5}. \quad (12)$$

Из (12) вытекает возможность применения формул:

$$\begin{cases} e^x = 1 + x \\ e^{-x} = 1 - x \end{cases}. \quad (13)$$

Из (12) и (13) следует, что вычисление экспонент  $\exp(x)$  и  $\exp(-x)$  на отрезке  $[0; 1]$  будем производить, используя свойства показательной функции. Представим значения мантиссы аргумента  $x$  в виде:

$$\Delta = \Delta x_1 + \Delta x_2, \quad (14)$$

причем

$$\Delta x_1 = \overline{0, b_1 b_2 b_3 b_4} 0000, \quad (15)$$

$$\Delta x_2 = \overline{0, 0000 b_5 b_6 b_7 b_8 b_9}, \quad (16)$$

где  $i=1,2,3,\dots,9$ ;  $b_i = \overline{0,9}$  - десятичные разряды мантиссы аргумента  $x$ ; разряд  $b_9$  берется как дополнительный.

На практике целесообразно формировать опорный массив констант  $M_1$  в ПЗУ соответствующий части мантиссы  $\Delta x_1$ , каждая из которых имеет четыре старших десятичных знака после запятой.

Используя формулу (1), оценим длину  $N_1$  части мантиссы  $\Delta x_1$  в двоичном коде:

$$N_1 = \frac{4}{\lg 2} \approx 13,3 \text{ бит} \approx 1,6 \text{ байт}. \quad (17)$$

Дополним  $N_1$  до длины стандартно принятого размера  $N_{1c} = 2$  байта. В этом

случае для стандарта достаточно выбрать десятичное значение  $A^{i_c}$  такое, что ей соответствует двоичное представление:

$$N_{1c} = \frac{5}{\lg 2} \approx 16,6 \text{ бит} \approx 2,1 \text{ бит.} \quad (18)$$

Из (18) следует, что объем  $M_1$  для фиксированных значений аргумента  $x$  равен

$$M_1 = 10^4 \cdot N_{1c} = \frac{10^4 \cdot 5}{8 \cdot 1024 \cdot \lg 1} = 40,28 \text{ Кбайт} \quad (19)$$

Вычисление функций  $\exp(x)$  и  $\exp(-x)$  с учетом (13) и (14) можно представить в виде:

$$\begin{cases} e^x = e^{\Delta x_1} e^{\Delta x_2} = e^{\Delta x_1} (1 + \Delta x_2) \\ e^{-x} = e^{-\Delta x_1} e^{-\Delta x_2} = e^{-\Delta x_1} (1 - \Delta x_2), \end{cases} \quad (20)$$

где значения  $e^{\Delta x_1}, e^{-\Delta x_1}$  хранятся в ПЗУ, а величина  $\Delta x_2$  поступает на вычисление с устройства ввода. В дальнейшем значения  $e^x$  и  $e^{-x}$  будем, в случае необходимости, употреблять в виде  $\exp(x)$  и  $\exp(-x)$  соответственно.

**Литература:** 1. Галушкин А.И. Некоторые исторические аспекты развития элементной базы вычислительных систем с массовым параллелизмом (80- и 90- годы) [Текст] / А.И.Галушкин // Нейрокомпьютер. – 2000, №1. – С. 68-82. 2. Реконfigurационный асинхронный сумматор-умножитель [Текст]: пат. 02159464 Рос. Федерация: МПК G 06F-7/50, МПК G 06F 7/52 / Довгаль В.М., Селезнев М.Е., Старков Ф.А., Титов В.С.; заявитель и патентообладатель Курский государственный технический университет. №99109904/09; заявл. 05.05.99; опубл. 20.11.00, Бюл.№32. – 4с.

## УДК 681.3

### ВЫЧИСЛЕНИЕ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ $SH(X), CH(X)$ МЕТОДОМ $\Delta$ -ПРИБЛИЖЕНИЙ

Довгаль В.М., докт. техн. наук, Малыхин В.В., канд. техн. наук,

Тютюнов Д.Н., Евдокимов А.Н., Овсянников О.И. (г. Курск, Россия)

*Calculation of hyperbolic functions  $SH(X), CH(X)$  by a method  $\Delta$  is offered.*

Вычисление гиперболического синуса и косинуса можно производить, воспользовавшись соотношением

$$\begin{cases} e^x = 1 + x \\ e^{-x} = 1 - x. \end{cases} \quad (1)$$

Рассмотрим произвольную точку  $\bar{x} \in [0;1]$ , в которой определяются значения функций. Выберем ближайшую точку  $x_1 < \bar{x}$ , в которой известно табличные значения  $shx_1, chx_1$  причем  $x_1$  содержит только 4 первых десятичных значащих цифры мантиссы. Вычислим разность:

$$\Delta x = \bar{x} - x_1. \quad (2)$$

Используя формулу (2), имеем:

$$sh\bar{x} = sh(x_1 + \Delta x) = (\exp(x_1 + \Delta x) - \exp(-(x_1 + \Delta x))) / 2 = shx_1 + chx_1 \Delta x, \quad (3)$$

$$ch\bar{x} = ch(x_1 + \Delta x) = (\exp(x_1 + \Delta x) + \exp(-(x_1 + \Delta x))) / 2 = chx_1 + shx_1 \Delta x, \quad (4)$$

где  $\Delta x \in [0; 0,00001)$ .

Значения  $shx$ ,  $chx$ , можно хранить в ПЗУ или вычисляются по формулам:

$$shx_1 = (exp(x_1) - exp(-x_1)) / 2, \quad (5)$$

$$chx_1 = (exp(x_1) + exp(-x_1)) / 2, \quad (6)$$

где величины  $exp(x_1)$  и  $exp(-x_1)$  хранятся в ПЗУ. Очевидно, что  $x \in [0; 1]$ .

Вычисление  $sh\bar{x}$  и  $ch\bar{x}$  можно делать непосредственно после получения  $exp(\bar{x})$  и  $exp(-\bar{x})$  по формулам (5) и (6), заменив  $x_1$  на  $\bar{x}$ :

$$sh\bar{x} = (exp(\bar{x}) - exp(-\bar{x})) / 2, \quad (7)$$

$$ch\bar{x} = (exp(\bar{x}) + exp(-\bar{x})) / 2, \quad (8)$$

В обоих случаях процесс вычисления  $sh\bar{x}$  и  $ch\bar{x}$  можно распараллелить, вычисляя отдельно  $sh\bar{x}$  и  $ch\bar{x}$ . Очевидно, что при последовательном доступе затраты времени  $\tau_{nc}$  на вычисление  $sh\bar{x}$  и  $ch\bar{x}$  определяется формулой:

$$\tau_{nc} = 2(\tau_{ac} + \tau_{cd}), \quad (9)$$

где  $\tau_{ac}$  – время алгебраического сложения экспонент  $exp(\bar{x})$  и  $exp(-\bar{x})$ ,  $\tau_{cd}$  – время сдвига (деление алгебраической суммы на 2).

При параллельном доступе затраты времени  $\tau_{np}$  определяется формулой:

$$\tau_{np} = \tau_{ac} + \tau_{cd}, \quad (10)$$

что в 2 раза быстрее, чем (8).

Сравнивая метод (3), (4) с методом (5), (6), можно понять, что в первом случае необходимо затратить гораздо больше времени на вычисление  $sh\bar{x}$  и  $ch\bar{x}$ , т.к. приходится определять  $shx_1$  и  $chx_1$  с последующим их умножением на  $\Delta x$ . Кроме того, необходимо расходовать ПЗУ на хранение  $shx_1$  и  $chx_1$ . Далее для вычислений будем применять метод (4), (5).

Если  $\bar{x} > 1$ , то в этом случае вычисления  $sh\bar{x}$  и  $ch\bar{x}$  дадут нужный результат при использовании формул (7) и (8), включающих в себя формулы

$$sh\bar{x} = \frac{e^{[x]} e^{\{x\}} - e^{-[x]} e^{-\{x\}}}{2}, \quad (11)$$

$$ch\bar{x} = \frac{e^{[x]} e^{\{x\}} + e^{-[x]} e^{-\{x\}}}{2}, \quad (12)$$

$$\begin{cases} e^x = e^{\Delta x_1} e^{\Delta x_2} = e^{\Delta x_1} (1 + \Delta x_2) \\ e^{-x} = e^{-\Delta x_1} e^{-\Delta x_2} = e^{-\Delta x_1} (1 - \Delta x_2), \end{cases} \quad (13)$$

где значения экспонент  $e^{|x|}$  и  $e^{-|x|}$  хранятся в ПЗУ величины  $e^{|x|}$  и  $e^{-|x|}$  вычисляются по формуле (13). И в этом случае достаточно организовать параллельный процесс

вычисления фрагментов  $\frac{e^{|x|} e^{|x|}}{2}$  и  $\frac{e^{-|x|} e^{-|x|}}{2}$ . Полученные фрагменты будут подвергнуты алгебраическому сложению. Время  $\tau_{np}$  вычислений  $sh\bar{x}$  и  $ch\bar{x}$  в этом случае:

$$\tau_{np} = \tau_{\phi} + \tau_{ac} + \tau_{cd}, \quad (14)$$

где  $\tau_{\phi}$  – время вычислений фрагмента соответствующей ветви.

При последовательном доступе время  $\tau_{nc}$  вычисления  $sh\bar{x}$  и  $ch\bar{x}$ :

$$\tau_{nc} = 2\tau_{\phi} + \tau_{ac} + \tau_{cd}. \quad (15)$$

Параллельный вариант (14) дает выигрыш во времени по сравнению с (15) на величину  $\tau_{\phi}$ .

**Литература:** 1. Галушкин А.И. Некоторые исторические аспекты развития элементной базы вычислительных систем с массовым параллелизмом (80- и 90- годы) [Текст] / А.И.Галушкин // Нейрокомпьютер. 2000, №1. – С. 68-82. 2. Реконfigurационный асинхронный сумматор-умножитель [Текст]: пат. 02159464 Рос. Федерация: МПК G 06F-7/50, МПК G 06F 7/52 / Довгаль В.М., Селезнев М.Е., Старков Ф.А., Титов В.С.; заявитель и патентообладатель Курский государственный технический университет. №99109904/09; заявл. 05.05.99; опубл. 20.11.00, Бюл.№32. – 4 с.

**УДК 539.3**

## **СВОБОДНЫЕ ГИДРОУПРУГИЕ КОЛЕБАНИЯ ЛОПАСТЕЙ РАБОЧИХ КОЛЕС ПОВОРОТНО-ЛОПАСТНЫХ ГИДРОТУРБИН**

**Кантор Б.Я.**, докт. техн. наук, **Ржевская И.Е.**, канд. техн. наук  
(г. Харьков, Украина)

*The method to evaluation of free vibrations frequencies and forms of Kaplan hydro-turbines blades and wheels in liquid based on the lifting surface theory is proposed. The numerical results for the real structures are demonstrated. The comparison of theoretical and experimental data was done. Free hydroelastic vibrations of Kaplan hydroturbines blades.*

Исследованию свободных колебаний конструкций, взаимодействующих с жидкостью, посвящено большое количество публикаций. Группой исследователей во главе с Бажановым В.Г. создан комплекс программ решения связанной задачи гидроупругости для плоских двухмерных и осесимметричных объектов. В работах Постнова В.А. предложено вариационное формулирование проблемы взаимодействия упругих элементов конструкций с жидкостью. В публикациях Гонткевича В.С., Горелова Д.Н., Ткачевой Л.А., Чена, Хонга, изучаются колебание отдельных элементов гидротурбины, при этом делаются такие предположения: применяется гипотеза о совпадении форм собственных колебаний в вакууме и жидкости; с помощью гипотезы цилиндрических сечений пространственная задача обтекания сводится к двумерной. Хотя в работах даны постановки задач гидроупругих колебаний лопастей турбомашин и винтов в трехмерном формулировании, но численные исследования не проведены.

В данной исследовательской работе поставлены и решены следующие основные научно-технические задачи: – сформулированы математические модели для исследования динамических характеристик лопастей рабочих колес поворотно-лопастных (ПЛ) гидротурбин; – обоснована целесообразность сведения рассматриваемых задач к гиперсингулярным интегральным уравнениям; – разработан эффективный метод численного решения задачи определения частот и форм свободных колебаний конструкций, которые взаимодействуют с водой; проведен анализ эффективности и применимости выбранного конечного элемента; – осуществлена апробация разработанных моделей и методов, используя известные в литературе аналитические и численные решения; – применены построенные модели к исследованию динамических характеристик лопастей рабочих колес ПЛ гидротурбин, проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными.

Лопасть рабочего колеса ПЛ гидротурбины состоит из пера лопасти и фланца, галтели сглаживают переход между их поверхностями (рис.1.а). Фланец является телом вращения, перо лопасти – оболочками переменной толщины. Для определения собственных частот колебаний лопасти рабочего колеса ПЛ гидротурбины использованы метод конечных элементов [1, 2] для отыскания собственных частот и форм колебаний колеса в вакууме и – метод граничных элементов для определения частот гидроупругих колебаний колеса в воде [3].

Для проверки предложенной методики выполнен численный анализ динамических характеристик лопасти рабочего колеса Головной ГЭС. Собственные частоты и формы колебаний модели лопасти рабочего колеса в воздухе и воде приведены на рис. 1, б,в,г. Отметим, что формы колебаний в воде и воздухе в рассмотренном диапазоне частот практически совпадают.

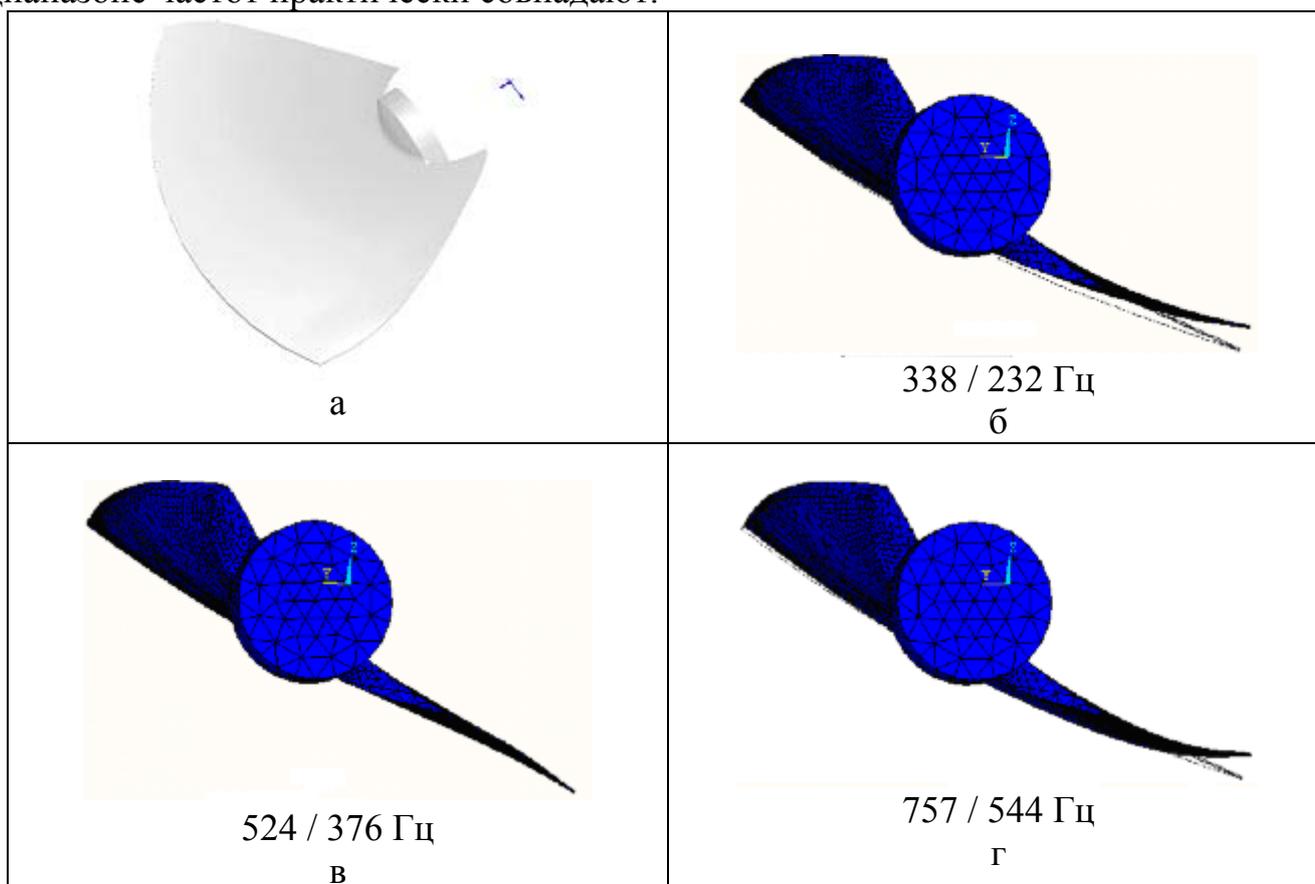


Рис. 1. Общий вид и формы колебаний в воде лопасти рабочего колеса ПЛ гидротурбины.

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами экспериментов [4] для данного типа лопасти, что подтверждает достоверность предложенной методики.

Разработан метод расчета собственных частот и форм гидроупругих колебаний элементов гидротурбин в трехмерной постановке. Сочетание МКЭ для расчета собственных колебаний рабочего колеса в вакууме, разложения искомым гидроупругих собственных форм в ряд по собственным формам колебаний рабочего колеса в вакууме и метода граничных интегральных уравнений для отыскания матрицы присоединенных масс воды обладает рядом существенных преимуществ. При этом резко уменьшается размерность задачи (порядок системы алгебраических уравнений), не требуется разработка сложной программы построения трехмерной сетки для конечного элемента воды и снижаются затраты времени на выполнение расчетов.

**Литература:** 1. Бате К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вильсон. – М.: Стройиздат, 1982.– 445 с. 2. Веремеенко И.С. Прочность и собственные колебания рабочих колес радиально-осевых гидротурбин / И.С. Веремеенко, Б.Я. Кантор, И.Е. Ржевская // Пробл. машиностроения. – 1999. – Т. 2, № 1–2. – С.8. 3. Веремеенко И.С. Расчет гидроупругих колебаний рабочих колес радиально-осевых гидротурбин / И.С. Веремеенко, Б.Я. Кантор, В.В. Науменко, И.Е. Ржевская, Е.А. Стрельникова, С.А. Андриющенко, О.И. Мусиенко // Вестник НПУ «Харьковский политехнический институт». – 2002. – Т. 12, №9. – С.58–68. 4. Явиц С.Н. Исследование частотных характеристик лопастей рабочих колес ПЛ гидротурбин / С.Н. Явиц // Энергомашиностроение.–1970.–№ 8. – С.25–28.

**УДК 669.14: 539.4**

## **НОВЫЙ ПОДХОД К СУММИРОВАНИЮ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ**

**Милешкин М.Б.**, канд. техн. наук, **Библик И.В.** (г. Харьков, Украина)

*On example of low carbonaceous steel and unidirectional constructional fibreglass the opportunity of computer modeling application is analyzed in the view of a hypothesis of linear summation of fatigue damages for an estimation of structural material damage degree during high-cycle fatigue.*

Детали машин и конструкций в процессе эксплуатации, как правило, подвергаются сложным режимам нагружения, когда последовательность значений амплитуд и средних напряжений цикла меняется случайным образом. При случайном нагружении суммарное число циклов до разрушения зависит от характера нагружения.

Вопросам суммирования усталостных повреждений уделяется значительное внимание. Наиболее развиты некоторые из них, например, гипотеза линейного суммирования повреждений Пальмгрена-Майнера; гипотезы нелинейного суммирования повреждений Марко-Старки; Генри; Гатса; Кортена-Долана и др. [1]. Анализ этих гипотез показывает, что, как правило, они оперируют лишь различными мерами повреждаемости материала, не уделяя при этом достаточного внимания физической картине усталостного разрушения.

В настоящей работе для исследования процесса накопления повреждаемости в процессе многоциклового усталости применен разработанный ранее расчетно-экспериментальный метод (РЭМ) [2]. Для сравнения результатов исследования рассмотрим в рамках РЭМ наиболее широко распространенную гипотезу линейного суммирования повреждений, в соответствии с которой условие разрушения записывается в виде [1]:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1,$$

где  $n_i$  – число циклов наработки за время эксплуатации при напряжении  $\sigma_i$ ;  $N_i$  – число циклов до разрушения при напряжении  $\sigma_i$ ;  $k$  – число уровней напряжения.

Анализ многочисленных данных, полученных в соответствии с гипотезой Пальмгрена-Майнера, показывает существенные отклонения от единицы накопленной повреждаемости в момент разрыва образцов, как в меньшую, так и в большую сторону. Так, например, для большинства конструкционных материалов эта величина находится в пределах 0,5...2 и зависит от статистического разброса опытных данных и от ширины доверительного интервала оценки величины накопленной суммы [3]. Основными недостатками линейной гипотезы являются невозможность

учета истории нагружения, исключение из расчета напряжений ниже предела выносливости, а также неучет индивидуальных особенностей образцов.

Как было показано ранее [4], РЭМ позволяет не только получать кривые усталости для различных материалов, но и оценивать на каждом этапе усталостного нагружения интегральную повреждаемость материала независимо от очередности воздействия напряжений различных уровней. Это означает, что доля повреждаемости на каком-либо  $i$ -ом уровне амплитуды напряжения цикла в рамках РЭМ может быть определена не только как  $n_i/N_i$  (согласно гипотезе линейного суммирования повреждений), но и непосредственно как отношение возникших на  $i$ -ом уровне микротрещин к их числу при полном разрушении образца на этом же уровне.

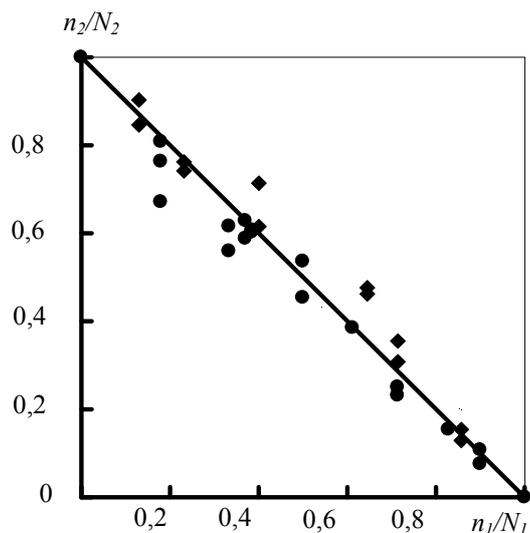


Рис. 1. ● – низколегированная сталь; ◆ – стеклопластик.

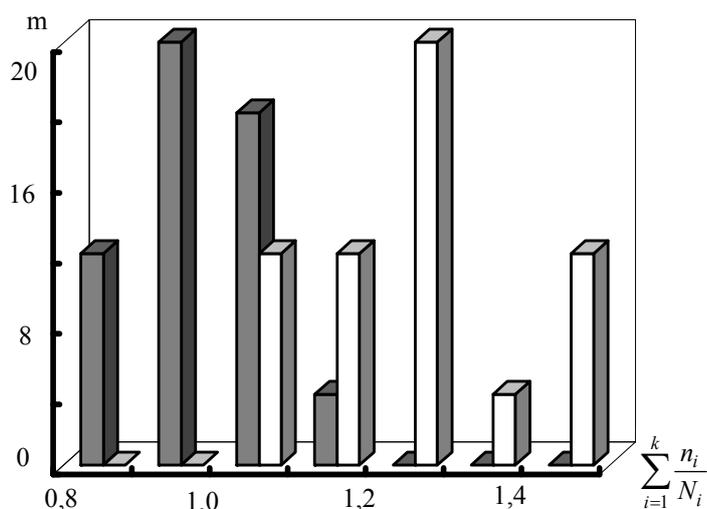


Рис. 2. Серый цвет – низколегированная сталь; белый – стеклопластик;  $m$  – число «наблюдений».

На рис. 1 приведено сравнение результатов расчетных значений повреждаемости образцов низкоуглеродистой стали и однонаправленного стеклопластика с правилом линейного суммирования повреждений Пальмгрена-Майнера для двух уровней напряжений (отнулевой цикл растяжение–сжатие) независимо от их очередности ( $n_2/N_2$  – относительное число оставшихся циклов;

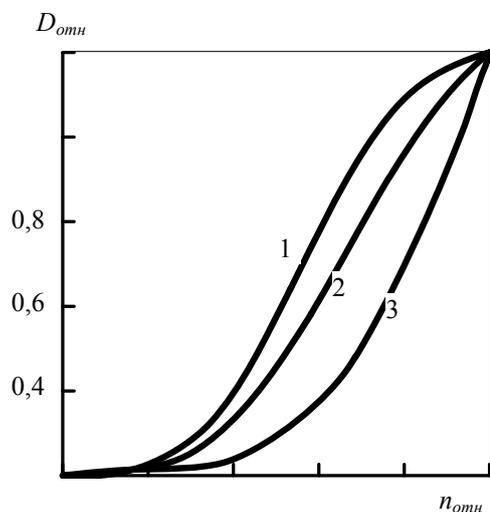


Рис. 3.

$n_1/N_1$  – относительное число приложенных циклов), а на рис. 2 – гистограмма распределения сумм относительных повреждаемостей для образцов этих же материалов, но при большем числе уровней напряжений цикла (до пяти) и различной их последовательности. Видно, что расчетные значения, определенные в соответствии с гипотезой Пальмгрена-Майнера, находятся в достаточно узком интервале (от 0,8 до 1,5) и хорошо укладываются на прямую (рис. 1).

В то же время необходимо заметить, что определение повреждаемости как относительного числа образовавшихся микротрещин показывает значительное расхождение с линейной гипотезой сумми-

рования повреждений. В качестве примера на рис. 3 приведены зависимости относительной повреждаемости ( $D_{отн}$ ), вычисленной с помощью РЭМ, от относительного числа циклов ( $n_{отн}$ ) при трех уровнях напряжений ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ) для образцов низколегированной стали. В дальнейшем предполагается провести сравнительный анализ этих результатов с некоторыми гипотезами нелинейного суммирования повреждений.

В заключение заметим, что применение РЭМ для суммирования усталостных повреждений может быть полезным и для определения ресурса оборудования, работающего в условиях смены режимов эксплуатации, когда история нагружения становится существенным фактором.

**Литература:** 1. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. – Анализ, предсказание, предотвращение: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 624 с. 2. Милешкин М.Б., Библик И.В. Основы применения специального расчетно-экспериментального метода для оценки несущей способности элементов конструкций и исследования особенностей их разрушения // Вісник Інженерної Академії України. – Київ, 2001. – №3. – С. 126-129. 3. Троценко В.Т., Сосновский Л.А. Сопроотивление усталости металлов и сплавов: Справочник. – Ч. 1. – К.: Наук. думка, 1987. – 512 с. 4. Милешкин М.Б., Библик И.В. Исследование кинетики многоциклового усталости методом компьютерного моделирования // Труды 7-й международной научно-технической конференции "Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве". – Харьков, 2003. – С. 210-212.

УДК 539.4:620.179.16

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА АМПЛИТУДНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Милешкин М.Б., канд. техн. наук, Библик И.В.,  
Стоев П.И., докт. техн. наук (г. Харьков, Украина)

*The features of computer modelling application for the analysis of acoustic emission signals amplitude distribution are considered by the example of system Be-BeO. It is shown, that good correlation between experimental results and results of computing experiment is observed.*

Метод акустической эмиссии (АЭ) является по существу единственным методом, позволяющим определять динамику изменения механических состояний в реальном масштабе времени во всем объеме материала. Активность АЭ, число импульсов АЭ, энергия, амплитудное распределение сигналов АЭ являются важными информационными параметрами. Однако до настоящего времени нет достаточно четко обоснованных моделей связи амплитудного распределения сигналов АЭ с конкретными видами и параметрами дефектов.

Как было показано ранее, одним из достоинств использования расчетно-экспериментального метода (РЭМ) [1] для оценки прочностной надежности элементов конструкций является получение и кривых АЭ. В связи с этим была исследована возможность проведения анализа амплитудного распределения сигналов АЭ при помощи подхода, основанного на определении кинетической энергии микротрещин [2] и на применении РЭМ.

В качестве объекта исследования были выбраны три сорта технического бериллия, полученные из одного промышленного порошка горячим прессованием по различным технологическим режимам. Круглые образцы диаметром 5 мм и длиной

рабочей части 20 мм испытывались на растяжение. Регистрация параметров АЭ проводилась разработанным в ИПМаш НАН Украины многоканальным комплексом М400. Уровни амплитудной дискриминации, приведенные ко входу предусилителя, составляли 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 и 100 мкВ.

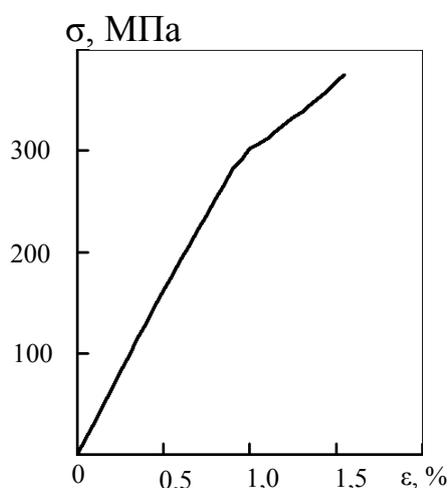


Рис. 1. Диаграмма деформации системы Ве-ВеО.

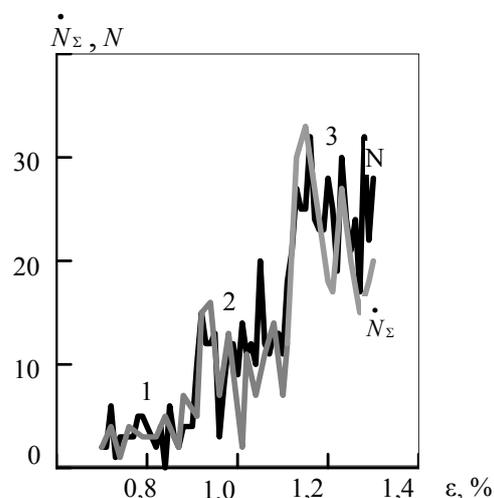


Рис. 2. Сравнение экспериментальных зависимостей с расчетной.

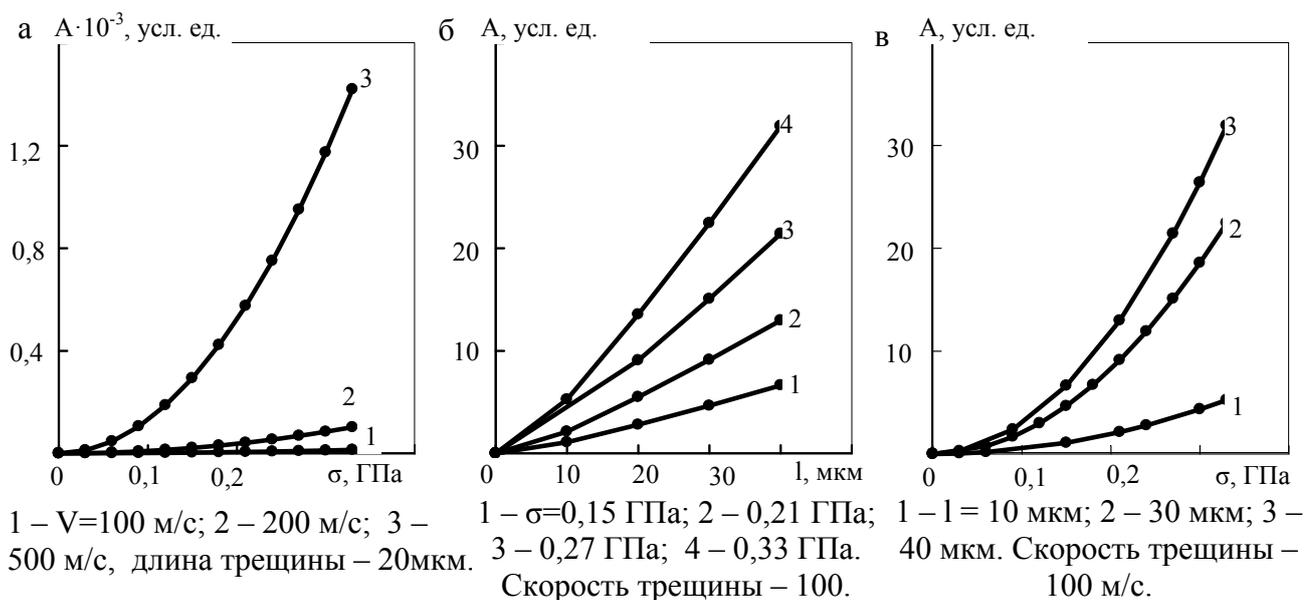


Рис. 3. Изменение амплитуды сигналов АЭ в зависимости от скорости трещины, длины трещины и приложенного напряжения.

Предельная деформация (деформация при полном разрушении) исследуемых материалов изменялась от 1,65 до 3,4 % (типичная диаграмма деформации, полученная с помощью РЭМ, приведена на рис. 1). Сопоставление результатов АЭ-измерений с результатами моделирования в области до предела текучести показало [3], что, если отождествлять каждый акт возникновения микротрещины при компьютерном "нагружении" материала с импульсом АЭ, то наблюдается хорошее соответствие между зависимостями активности АЭ ( $\dot{N}_\Sigma$ ) по низкоамплитудным каналам регистрации АЭ и кривыми накопления микроразрывов ( $N$ ) в материале. По-

видимому, это означает, что в упругой области основной вклад в АЭ дает разрушение более хрупких прослоек окиси бериллия (толщина прослоек составляла 2 мкм, прослойки располагались по границам приблизительно 25 % зерен бериллия в равном соотношении (вдоль и поперек) по отношению к направлению компьютерного "нагружения"). Средний размер зерен бериллия составлял 25 мкм.

Поскольку после достижения предела текучести возможен существенный вклад в параметры АЭ дислокационных процессов, при сопоставлении экспериментальных результатов с результатами моделирования за пределом текучести расчет проводился только с учетом контурных смещений частиц материала по берегам трещин [3]. Видно (рис. 2), что и в этом случае также наблюдается хорошее соответствие экспериментальных кривых расчетным, при этом в области предела текучести амплитуда сигналов АЭ, определенная численным моделированием, увеличивается (1 – 60 мкВ, 2 – 70 мкВ, 3 – 40 мкВ).

Методом численного моделирования был оценен и возможный диапазон изменения амплитуд сигналов АЭ (рис. 3, а–в). Видно, что, как и при испытании образцов, может наблюдаться значительная разница в величинах амплитуд в зависимости от длин микротрещин и скоростей их распространения. Для рассмотренных случаев самое большое влияние на амплитуду АЭ оказывает скорость распространения трещины (рис. 3,а).

**Литература:** 1. Mileshkin M.B., Biblik I.V. Diagnostics for strength of fibre-epoxy composite material wares using computer modeling of fracture processes // Computer Methods and Inverse Problems in Nondestructive Testing and Diagnostics: Proceedings 2<sup>nd</sup> Int. Conf., Minsk. - Minsk, 1998. - P. 123 – 129. 2. Эрдоган Ф. Теория распространения трещин // Разрушение / Под ред. Г. Либовица. – М., 1973. – Т.2. – С. 521-615. 3. Милешкин М.Б., Библик И.В., Стоев П.И. Анализ амплитудного распределения сигналов акустической эмиссии на основе расчетно-экспериментального метода // Физическая мезомеханика. Спец. выпуск: Материалы МК по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов. – Томск, 2004. – Т.7, ч. 1. – С. 206-209.

### УДК 539.3

## АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАСТИНАХ НЕКАНОНИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Сметанкина Н.В., канд. техн. наук, Свет Е.В.,

Шупиков А.Н., докт. техн. наук (г. Харьков, Украина)

*An analytical solution has been obtained for the problem of nonstationary heat conduction for multilayer plates of uncanonical plan shape when they are heated with inter-layer film heat sources. The temperature distribution over the thickness of each layer is represented in the form of an expansion in a system of the orthonormal Legendre polynomials. Temperature fields were investigated in a five-layer plate for conditions of convective heat exchange with the environment.*

Достоверное определение теплового состояния элементов конструкций является в современной технике одной из актуальных задач. Как показывает анализ литературных источников, наиболее исследованы однородные конструкции. В случае неоднородных (многослойных) элементов конструкций, задачи теплопроводности решаются с привлечением различного рода гипотез о распределении температуры по толщине пакета слоев [1, 2]. Если конструкция имеет сложную форму в плане, чаще всего применяются численные методы [2]. Использование аналитических ме-

тодов связано с преодолением значительных математических трудностей при описании геометрических параметров многослойных тел сложной конфигурации [1, 2].

Целью настоящей работы является разработка метода решения задачи нестационарной теплопроводности многослойных пластин неканонической формы, который дает возможность представить решение задачи в аналитическом виде без привлечения гипотез о распределении температуры по толщине слоя.

Рассматривается многослойная пластина, собранная из  $I$  слоев постоянной толщины  $h_i$  ( $i = \overline{1, I}$ ). Пластина отнесена к декартовой системе координат, которая связана с наружной поверхностью первого слоя и занимает на координатной плоскости область  $\Omega$ , ограниченную контуром  $L : x_L = x(s), y_L = y(s)$  ( $s$  – текущая длина дуги). На верхней, нижней и боковых поверхностях пластины происходит конвективный теплообмен. Уравнение теплопроводности и граничные условия для многослойной пластины получаются из вариационного уравнения теплового баланса [4]. Метод решения состоит в том, что исходная многослойная пластина произвольной формы в плане погружается во вспомогательную прямоугольную многослойную пластину с той же композицией слоев и нулевыми условиями на контуре. Распределение температуры в слоях и на боковой поверхности, а также плотность внутренних тепловых источников представляется в виде разложения по полиномам Лежандра [4]. Чтобы обеспечить выполнение реальных граничных условий (5) на боковой поверхности, к вспомогательной пластине по следу границы  $L$  прилагаются дополнительные компенсирующие источники  $q_i^{comp}(x, y, z, \tau)$ , которые входят в уравнение теплопроводности в виде интегральных соотношений [4]. Граничные условия на следе контура  $L$ , которым должно удовлетворять аналитическое решение, приводят к системе интегральных уравнений для определения интенсивностей компенсирующих источников. Далее искомые функции разлагаются в тригонометрические ряды по функциям, удовлетворяющим граничным условиям охватывающей прямоугольной пластины, что позволяет свести решение системы уравнений теплопроводности к интегрированию системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Кроме того, функции, входящие в граничные условия исходной пластины, разлагаются в ряд вдоль следа контура  $L$ . В результате этих преобразований система интегральных уравнений на каждом шаге по времени сводится к системе линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов разложения в ряд вдоль контура функций компенсирующих источников.

В качестве примера рассматривается пятислойная пластина, контур пластины составлен из прямых и дуг окружностей (рис. 1),  $l_1 = 740$  мм,  $l_2 = 160$  мм,  $l_3 = 750$  мм,  $l_4 = 260$  мм,  $R_i = 30$  мм,  $i = \overline{1, 4}$ . Слои выполнены из материалов со следующими характеристиками:  $E_i = 6,8 \cdot 10^4$  МПа (модуль упругости),  $\nu_i = 0,22$  (коэффициент Пуассона),  $\rho_i = 2520$  кг/м<sup>3</sup> (плотность),  $\alpha_i^t = 9 \cdot 10^{-6}$  °С<sup>-1</sup> (коэффициент линейного температурного расширения),  $i = 1, 3, 5$ ;  $E_i = 2,2 \cdot 10^2$  МПа,  $\nu_i = 0,38$ ,  $\rho_i = 1060$  кг/м<sup>3</sup>,  $\alpha_i^t = 8,3 \cdot 10^{-5}$  °С<sup>-1</sup>,  $i = 2, 4$ ;  $h_1 = 5$  мм,  $h_2 = 3$  мм,  $h_3 = 12$  мм,  $h_4 = 2$  мм,  $h_5 = 8$  мм. Боковая поверхность пластины считается идеально теплоизолированной. Задача теплопроводности решена с такими исходными данными:

$k_i = 1,08 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ ,  $i = 1, 3, 5$ ;  $k_i = 0,22 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ ,  $i = 2, 4$  (коэффициенты теплопроводности материала  $i$ -го слоя);  $H_1 = 433 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)}$ ,  $H_2 = 20 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)}$  (коэффициенты конвективного теплообмена на верхней и нижней поверхностях пластины);  $T_1 = -30^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 20^\circ\text{C}$  (температура среды на границе с верхней и нижней поверхностями). Пленочный источник тепла мощностью  $q = 6 \text{ кВт/м}^2$  расположен между первым и вторым слоями пластины. На рис. 1, а представлено распределение температуры в момент времени  $\tau = 10^3 \text{ с}$  на поверхности с источником тепла, а на рис. 1, б – по толщине пластины в точке  $D$ . Расположение источника показано на рис. 1, а штриховой линией. На поверхности раздела первого и второго слоев пластины наблюдается резкое изменение температуры, вызванное наличием источника тепла.

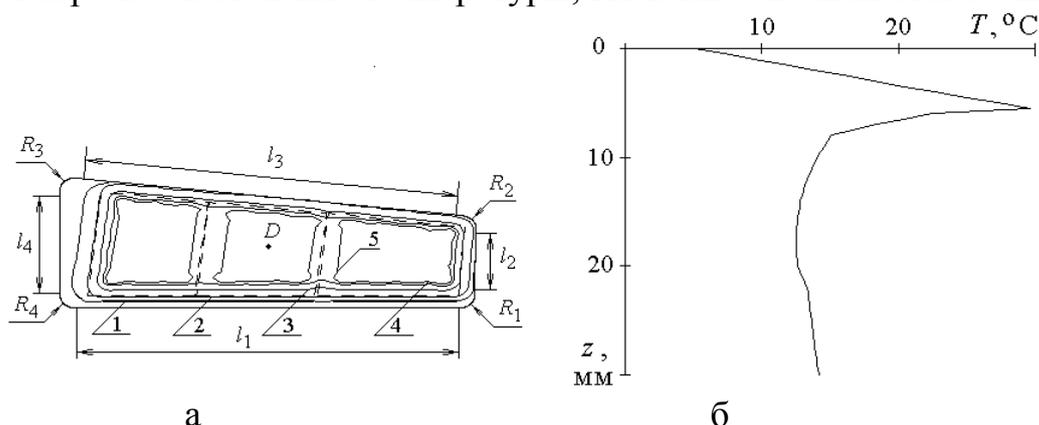


Рис. 1. Распределение температуры на поверхности и по толщине пластины: 1 –  $-4^\circ\text{C}$ ; 2 –  $0^\circ\text{C}$ ; 3 –  $15^\circ\text{C}$ ; 4 –  $25^\circ\text{C}$ ; 5 –  $30^\circ\text{C}$ .

Таким образом, разработан аналитический метод решения задач нестационарной теплопроводности многослойных пластин, позволяющий описать тепловое состояние пластин неканонической формы в плане при различных вариантах граничных условий на контуре и лицевых поверхностях пластины.

**Литература:** 1. Слесаренко А.П., Меша Ю.В. Математическое моделирование температурных полей в многослойном анизотропном теле сложного сечения // Доп. НАН України. – 2003. – № 5. – С. 82–85. 2. Oguamanam D.C.D., Hansen J.S., Heppler G.R. Nonlinear transient response of thermally loaded laminated panels // J. Applied Mechanics. – 2004. – V. 71, № 1. – P. 49 – 56. 3. Сметанкина Н.В., Свет Е.В., Шупиков А.Н. Задача стационарной теплопроводности многослойных пластин со сложной формой // Проблемы машиностроения. – 2004. – Т. 7, № 3. – С. 25-31.

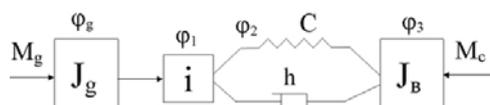
УДК 621.833.7

## КРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВИБРОСТОЙКОСТИ СИЛОВЫХ ВОЛНОВЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

**Воробьев Ю.С.**, докт. техн. наук, **Приймаков Г.А.** (г. Харьков, Украина)

*The estimation of dynamic loads arising in power wave gear drives is given. The criteria estimation of a vibration velocity of these transfers is designed.*

Разработана математическая модель силовой волновой зубчатой передачи с



металлополимерным гибким колесом:  $J_g$  – момент инерции входного вала и генератора волн;  $J_b$  – момент инерции выходного вала, связанного с гибким колесом;  $C$  –

жесткость волновой передачи (приведенная),  $h$  – эквивалентный коэффициент металлополимерного контакта генератора с гибким колесом;  $\varphi_g, \varphi_3$  – углы поворота соответственно входного вала и выходного вала;  $i$  – передаточное отношение волновой передачи;  $\varphi_1, \varphi_2$  – углы поворота генератора волн и гибкого колеса;  $M_g, M_c$  – моменты входного вала (с генератором волн) и выходного вала (внешняя нагрузка).

Допущения:

1. Рассматриваем только крутильную форму колебаний волнового механизма.
2. Жесткость волновой передачи оцениваем единой приведенной величиной  $C$ .
3. Силами трения в зацеплении пренебрегаем.
4. Возмущения от зубчатого зацепления представим в виде  $i = va$ ,  $M_g, J_g, \varphi_g$  – приведем к координате  $\varphi_1$ ;  $M_c, J_b, \varphi_3, C, h$  – к координате  $\varphi_2$ .

Составляем уравнения движения волнового механизма с помощью уравнений Лагранжа II рода. Выберем в качестве обобщенных координат углы поворота  $\varphi_2, \varphi_3$  и представим передаточное отношение  $i$  в виде ряда Фурье, удержав в нем только од-

$$i = i_{21}(\varphi_2) = u_{21} [1 + \mu \sin(z_2 \varphi_2 + \beta)],$$

ну резонирующую гармонику: где:  $u_{21} = z_2/z_1$ ,  $z_2$  – число зубьев жесткого колеса,  $z_1$  – число зубьев гибкого колеса,  $\mu$  – относительная погрешность передаточного отношения,  $\beta$  – фаза действия погрешности передаточного отношения.

Тогда уравнения движения динамической системы волнового механизма в безразмерном времени  $\tau = w_0 t$  имеют вид:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 + 2b\dot{x}_1 + x_1 = (\varepsilon_1 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4) + \varepsilon_2 \\ \ddot{x}_2 = (\varepsilon_1 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4)a_1 - \varepsilon_2 a_2; \end{cases}$$

$$x_1 = \varphi_2 - \varphi_3; x_2 = a_1 \varphi_2 + a_2 \varphi_3;$$

$$a_1 = 1 - a_2; a_2 = \frac{J_b}{J_b + J'_d}; J'_d = \frac{J_d}{u_{21}^2}; M'_d = \frac{M_d}{u_{21}};$$

$$\varepsilon_1 = \frac{M'_d}{J'_d w_0^2} (1 + \mu \sin \mu); \varepsilon_2 = \frac{M_c}{J_b w_0^2};$$

$$\varepsilon_3 = 2 a_2 \mu (x_1 + 2 b \dot{x}_1) \sin \gamma;$$

$$\varepsilon_4 = (\dot{x}_1 a_2 + \dot{x}_2)^2 \mu z_2 \cos \gamma;$$

$$\gamma = z_2 \varphi_2 + \beta = z_2 (a_2 x_1 + x_2) + \beta;$$

$$2b = \frac{h}{J_b a_1 w_0^2}; w_0^2 = \frac{C (J_b + J'_d)}{J_b J'_d}.$$

В этой системе численное интегрирование полученной системы уравнений показывает, что при  $a_2 \rightarrow 0$  и декременте колебаний  $\delta < 1$  амплитуда колебаний координаты  $x_1$  может быть оценена при  $z_2 x_2 = \tau$ .

В этом случае при резонансных колебаниях волнового механизма с частотой

$$\begin{cases} A_2 \leq (0,00013 \div 0,012) \sum_{j=1}^k \frac{1}{j \sqrt{(1 - \nu^2)^2 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 \nu^2}} \\ A_4 \leq (0,00043 \div 0,0002) \frac{\pi}{\delta}, \end{cases}$$

$$\text{где } \nu = \frac{j n w_p}{w_0}; \delta = b \frac{2\pi}{w_0}.$$

волнового зубчатого зацепления амплитуды колебаний координаты  $x_1$  от возмущений  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_4$  могут быть оценены соответственно из выражений:

Например, при декременте колебаний  $\delta=0,314$  и  $nw_p=0,2w_0$   
 $A_2 < 4,3(0,00013 \div 0,012) = 0,00056 \div 0,052$ ;  $A_4 < 10(0,00043 \div 0,0002) = 0,0043 \div 0,002$ .

Как видно,  $A_4$  на порядок больше  $A_2$ , т.е.  $A_4 \gg A_2$ .

При резонансных колебаниях передачи с  $n$ -волновым зацеплением динамические нагрузки в ней от внешних и внутренних возмущений могут быть соизмеримы. Доля динамической нагрузки, вызываемой волновым зубчатым зацеплением, тем больше, чем меньше коэффициент динамичности внешней нагрузки и чем меньше точность волнового зубчатого зацепления по норме плавности работы.

Динамические нагрузки, действующие в волновом зубчатом зацеплении, могут быть снижены:

- за счет уменьшения жесткости волнового привода и увеличения податливости всех элементов волнового зацепления: генератора волн гибкого и жесткого колес, соединения гибкого колеса с выходным валом;
- большей точности волнового зубчатого зацепления;
- увеличения числа зубьев гибкого и жесткого зубчатых колес;
- увеличения числа волн деформации  $n$ , и числа одновременно зацепляющихся зубьев (в известных пределах для  $n$ -волнового генератора волн).

Следует рекомендовать исключать резонансные режимы работы волновых механизмов, т.е. перейти к строгим неравенствам относительно амплитуд  $A_2$  и  $A_4$ .

Конструктивно для предотвращения резонансных режимов рекомендуется применять специальные демпфирующие устройства.

С помощью полученных математических выкладок можно говорить о критериальной оценке вибростойкости силовых волновых зубчатых передач и даже прогнозировать ее на стадии проектирования этих передач.

Благодаря своим неоспоримым преимуществам, силовые волновые зубчатые передачи находят широкое применение в среднем машиностроении, а именно: в конструкциях летательных аппаратов, в технике подводного флота, в ракетно-космической технике и т.д.

**УДК 539.4:621.165**

## **ВЛИЯНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК НА ИХ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ И ВИБРАЦИОННЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ**

**Воробьев Ю.С.**, докт. техн. наук, **Стороженко М.А.** (г. Харьков, Украина)

*The work presents an analysis of vibrations, and investigates the distribution of stress localizations in damaged turbine blading. The affect of the different depth and location of cracks on the vibration characteristics is analyzed. The validity of results obtained has been ensured by comparison with experimental data.*

Одной из наиболее важных задач современного турбостроения является обеспечение вибрационной прочности лопаточного аппарата. Причем основную опасность представляет локализация вибрационных напряжений, которая вызывается сложной конструктивной формой объектов, технологическими и эксплуатационными факторами. К последним относятся появление трещин и трещиноподобных дефектов.

Для получения адекватной картины распределения вибрационных полей напряжений в лопатках необходимы анализ влияния повреждений на динамическое напряженно-деформированное состояние (НДС) системы и разработка приемов их учета. Для наиболее точного и полного описания геометрии конструкции необходимо использование трехмерных моделей. Трехмерные конечно-элементные модели позволяют варьировать место расположения трещины и ее размер. В работе рассматриваются колебания камертонного образца, моделирующего пакет лопаток, с повреждениями типа трещин на основании трехмерных конечноэлементных моделей.

Существует в основном два подхода для построения конечно-элементных моделей конструкций с трещиной. Первый использует разбиение всей исследуемой области обычными конечными элементами с существенным сгущением сетки элементов по мере приближения к вершине трещины. Второй заключается в применении специальных элементов, окружающих вершину трещины, что позволяет учитывать особенности распределения напряжений вблизи вершины [1].

*Постановка задачи.* В предыдущих работах авторов рассматривалось влияние размера и места расположения трещины на колебания пакета лопаток [2, 3]. В данной работе ставится цель определить достоверность полученных численных результатов колебаний камертонного образца с трещиной, моделирующего пакет лопаток, путем сравнения их с экспериментальными данными, полученными в Институте проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины.

Для моделирования сингулярного поля напряжений в вершине трещины использовались изопараметрические квадратичные конечные элементы с двадцатью узлами, функции формы которых позволяют описать изменения напряжений внутри элемента с большими градиентами.

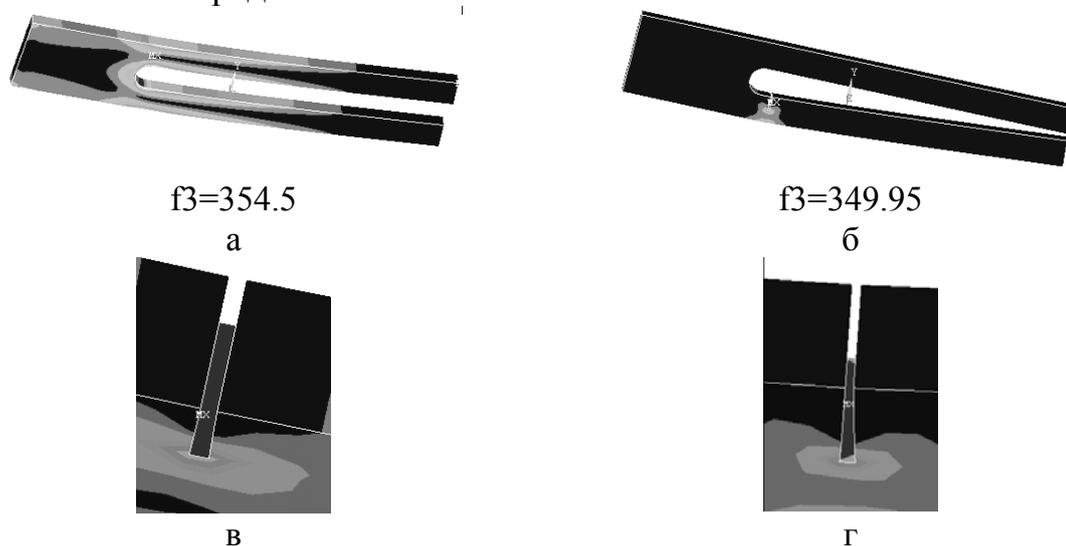


Рис. 1. Поля интенсивностей напряжений и частоты колебаний в Гц при колебаниях по третьей форме без трещины (а), с трещиной глубиной 8 мм (б) и вблизи трещины глубиной 4мм (в) и 8 мм (г).

*Численный анализ.* В работе рассмотрено влияние глубины и места расположения трещины на формы колебаний камертонного образца, моделирующего пакет лопаток. Сравнялось напряженно-деформированное состояние камертонного образца без трещины (рис. 1,а) и с различной глубиной и местами расположения поперечной трещины (рис. 1,б,в,г), а также проведено сравнение численных данных с экспериментальными.

Экспериментальные исследования колебаний образца камертонного образца проводились для случая первой изгибной формы колебаний стержней в плоскости их максимальной жесткости. При наличии повреждения одного из стержней нарушается регулярность системы, вследствие чего возбуждаются синфазная и антифазная формы колебаний стержней. Полученные при этом частотные характеристики рассматриваемой колебательной системы соответствуют расчетной частоте  $f_3$  ее конечноэлементной модели.

*Результаты исследования.* Анализ расчетных и экспериментальных данных показал, что хотя абсолютные значения частот колебаний несколько и различаются, однако отношение частот расстроенной и настроенной систем  $\bar{f}_3 = f_3 / f_3$  без трещины практически совпадают. Для сопоставления расчетных и экспериментальных данных в таблице 1 приведены результаты выполненных работ. Для синфазных колебаний различие абсолютных значений расчетных и экспериментальных частот не превышает 3 %, а для антифазных – 5 %.

Таблица 1

Частоты колебаний в Гц при колебаниях камертонного образца по третьей форме

	№ частоты	без трещины	Глубина трещины				
			1 мм	2 мм	4мм	6мм	8 мм
Расчет	$f_3$	354,5	353,35	349,95	332,69	300,5	254,54
	$\bar{f}_3$	1,000	0,997	0,987	0,938	0,848	0,718
Эксперимент	$f_3$	344,88	343,58	339,14	326,43	299,96	257,12
	$\bar{f}_3$	1,000	0,996	0,983	0,946	0,87	0,745

**Литература:** 1. Воробьев Ю.С., Романенко В.Н., Тишковец Е.В., Стороженко М.А. Колебания турбинных лопаток с повреждениями // Вибрации в технике и технологиях. – 2004. - №5(37). – С. 47-51. 2. Воробьев Ю.С., Романенко В.Н., Стороженко М.А. Колебания пакета лопаток с повреждениями // Вестник двигателестроения. – 2005. - №2. – С. 118-120. 3. Воробьев Ю., Романенко В., Стороженко М., Тишковец Е. Проблемы численного анализа лопаточного аппарата турбомашин // IX Konferencja Naukowo-Techniczna “Programy MES w komputerowym wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania” (Gizycko, 19-22 pazdziernika 2005) – P. 121-128.

УДК 620.9; 621.165; 539.3:534.1

## ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЗАЩЕМЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ Т-ОБРАЗНОГО ХВОСТОВИКА НА ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТКИ

Воробьев Ю.С. докт. техн. наук, Жондковски Р., докт. техн. наук,

Гошкодеря В.П. канд. техн. наук, Романенко В. Н.

(г. Харьков, Украина; г. Гданьск, Польша )

*The influence of various schemes of rigid fixing of shank root elements on blade natural vibration modes is considered. Three-dimensional fem is used for numerical analysis of blade vibration. These results can be used for designing blades and offset their frequencies from resonance.*

В практике создания рабочих лопаток турбомашин проблеме правильного выбора конструкции хвостового соединения рабочих лопаток с диском уделяется

большое внимание. Разработаны многочисленные подходы, позволяющие аналитически и численно решать вопросы прочности и колебания рабочих лопаток [1]. По

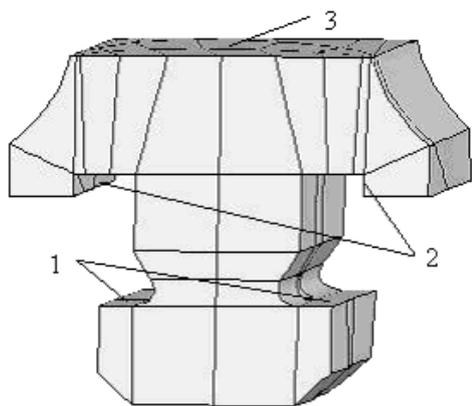


Рис. 1. Т-образный хвостовик.

результатам таких расчетов можно судить о напряженном состоянии рабочих лопаток и хвостового соединения. В этом вопросе особую роль играет вибрационная настройка. Она осуществляется за счет конструктивных мероприятий. Однако при массовом изготовлении лопаток частоты их колебаний могут отличаться от расчетных и полученных при настройке опытных образцов. С другой стороны, частотные характеристики лопаток в процессе эксплуатации не остаются стабильными. Это может быть следствием как изменения податливости заделки пера лопатки, так и хвостового соединения. Особую роль играет изменение места заземления элементов хвостовика в процессе эксплуатации. Для

обеспечения надежной работы лопаточного аппарата необходимо учитывать возможную нестабильность заземления хвостового соединения.

**Постановка задачи.** Для спектра собственных частот рабочей лопатки определяющее влияние оказывают конструктивные особенности пера лопатки, бандажных связей, хвостового соединения и др. Учет податливости заделки в том или ином виде позволяет аппроксимировать упругое взаимодействие корневого сечения лопатки с диском или основанием хвостового соединения лопатки. Важно правильно учесть особенности конструкции хвостовика лопатки и области его заземления. В паровых турбинах широкое применение нашли Т-образные конструкции хвостовых соединений. На рис. 1 показан один из конструктивных вариантов хвоста лопатки. Прометельная часть хвоста лопатки выполнена с заплечиками. Такая конструкция предполагает наличие нескольких плоскостей, заземление по которым может оказывать различное влияние на частоты собственных форм колебаний лопатки. Мы рассмотрим случаи жесткого заземления хвостового соединения по площадкам 1 полок хвоста лопатки и площадкам 2 заплечиков. Корневое сечение пера лопатки сопрягается по площадке 3 с прометельной частью хвоста. Вопросы учета податливости заделки лопатки в диск рассмотрены в работах [1, 2, 3]. В работе [4] проанализированы факторы, влияющие на граничные условия, и сделана попытка, на основе экспериментальных данных, сузить диапазон возможных значений частот.

Рассмотрим незакрученную единичную лопатку постоянного несимметричного поперечного сечения с Т-образным хвостом. На вершине лопатки учитывалось наличие полки. Ее влияние, в основном, сводилось к воздействию на лопатку как присоединенной массы. Длина лопатки  $l=13,07$  см.

**Метод решения.** Для исследований использовалась трехмерная математическая модель лопатки, построенная на основе метода конечных элементов (МКЭ). Формулировка проблемы колебания лопаток турбины базируется на классическом подходе МКЭ, и приводит к решению уравнения для собственных частот и векторов

$$(K - \omega^2 M)u = 0,$$

где  $u$  – вектор перемещений;  $\omega$  – частота собственных форм колебаний;  $K$  – матрица

жесткостей;  $M$  – матрица масс. В конечно-элементной модели использовался трехмерный изопараметрический криволинейный 20-и узловой элемент.

Частоты собственных форм колебаний, Гц			
№ частоты	Плоскость жесткого защемления элементов хвоста лопатки		
	заплечики и полки хвоста	заплечики	полки хвоста
1	2	3	4
1	668,7	631,4	486,2
2	1253,1	1242,2	676,4
3	2970,8	2965,9	2683,1
4	3789,6	3587,1	2798,5
5	5908,2	5877,2	4142,2
6	6655,6	6409,0	6059,8
7	8297,3	6637,7	6672,5
8	9151,1	7786,4	6825,1
9	9445,3	8541,8	6999,0
10	14839,5	9443,0	9984,3

**Результаты расчетов.** Осуществлен ряд расчетов, в которых изменялись площадки закрепления хвоста лопатки. В таблице показаны частоты собственных форм колебаний для случая трех возможных вариантов защемления элементов хвоста лопатки. Во второй колонке таблицы показаны частоты собственных форм колебаний лопатки при защемлении хвоста лопатки по внутренней поверхности заплечиков промтельной части (площадки 2) и по полкам хвоста (площадки 1). В третьей колонке показаны частоты собственных форм колебаний лопатки при защемлении хвоста лопатки по внутренней поверхности заплечиков промтельной части (площадки 2). По результатам этих расчетов можно сделать вывод, что ослабление или отсутствие защемления по поверхностям полок хвоста лопатки, приводит к существенным изменениям первой собственной частоты (в данном примере около 5,6%). В четвертой колонке представлены результаты для случая, когда закрепление по заплечикам (площадки 2) полностью отсутствует и оно перешло на полки хвоста (площадки 1). В данном примере отличие в жестком защемлении по обеим площадкам (вторая колонка таблицы) от жесткого защемления по площадкам 1 (четвертая колонка) по первой собственной частоте составляет более 27%. Для второй собственной частоты колебаний аналогичные сопоставления дают отличие в 46%. Для более высоких частот колебания эти показатели существенно ниже. Так для третьей собственной частоты колебаний соответственно при сравнении второй колонки с третьей мы имеем 0,2%, а при сравнении второй колонки с четвертой отличие в частотах составляет 10%.

На рис. 2 показано распределение интенсивностей напряжений при колебаниях по третьей собственной частоте. Рис. 2,а соответствует жесткому закреплению по внутренней поверхности заплечиков промтельной части (площадки 2) и по полкам хвоста (площадки 1). Заметен благоприятный характер распределения полей интенсивностей напряжений по перу и хвостовику лопатки. На рис. 2,б распределение интенсивностей напряжений соответствует жесткому закреплению по внутренней поверхности заплечиков промтельной части (площадки 2). В этом случае повышается

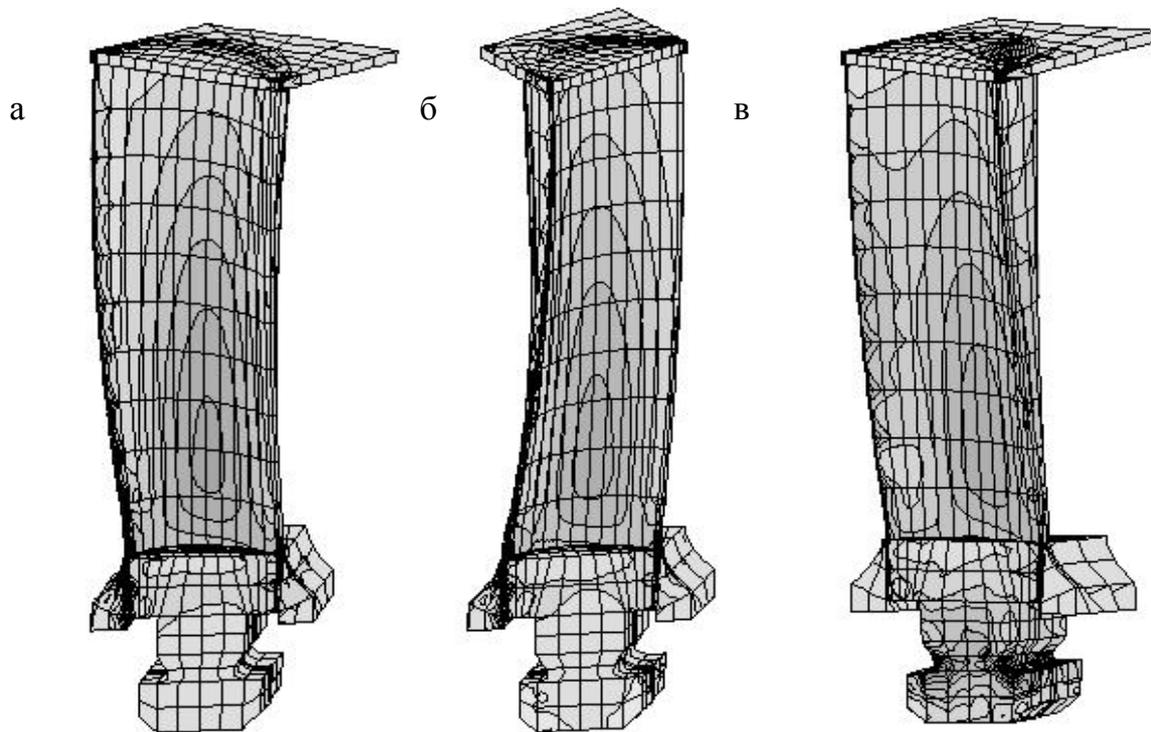


Рис. 2. Распределение интенсивностей напряжений при свободных колебаниях по третьей собственной частоте при различных закреплениях элементом хвоста лопатки.

локализация напряжений в области заплечиков, а сам хвост участвует в колебательных движениях. Претерпевает некоторые изменения форма колебаний. На рис. 2, в показано распределение интенсивностей напряжений, которое соответствует жесткому закреплению полок хвоста и свободным заплечикам. Видны значительные локализации интенсивностей напряжений в области переходных галтелей полок и ножки хвоста лопатки и существенные изменения полей интенсивностей напряжений пера лопатки.

**Выводы.** Сравнение полученных результатов показывает, что изменения в процессе эксплуатации условий защемления хвостового соединения лопаток может привести к существенному изменению интенсивностей напряжений в пере и хвостовике лопатки, а при ослаблении или отсутствии защемления по заплечикам могут появиться значительные зоны локализации интенсивностей напряжений на полках хвоста и в районе переходных галтелей. Такие явления приводят к значительным нарушениям настройки лопаточного аппарата. Последствия изменения собственных частот могут быть негативными. Поэтому целесообразно осуществлять предварительный анализ подобных ситуаций и разрабатывать мероприятия для их устранения.

**Литература:** 1. Левин А. В. Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин / А.В. Левин, К.Н. Борیشانский, Е.Д. Консон // Л.: Машиностроение, 1981. – 710 с. 2. Воробьев Ю.С. Колебания лопаточного аппарата турбомашин// К.: Наук. думка, 1988. – 224 с. 3. Воробьев Ю.С. Учет податливости заделки лопатки в диск при свободных колебаниях / Ю.С. Воробьев, Р. Жондковски, В.П. Гошкодеря, А.Н. Цыба // Проблемы машиностроения. –2005, –8, №2. – С. 45-50. 4. Гаврилов С.Н. Влияние податливости в хвостовом соединении на собственные частоты колебаний рабочих лопаток // Вибрации в технике и технологиях. – 2001.– №4. – С. 61-62.

## ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРО-ПОРШНЕВЫХ ПАР НАСОСА ГИДРООБЪЕМНОЙ ПЕРЕДАЧИ С ШАРИКОВЫМИ ПОРШНЯМИ

**Шатохин В.М.**, докт. техн. наук, **Зайцев А.И.**, докт. фарм. наук,  
**Шаповалов А.В.**, канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)

*Algorithm of deterioration diagnostics for cylinder-piston couples of rotary-plunger hydromashine are stated. Experimental data on pump-stator vibrations with high self-descriptiveness, simplicity of receipt and treatment as diagnostic parameters are assumed.*

**Введение.** Одно из самых передовых и эффективных направлений создания бесступенчатых трансмиссий мобильных транспортных и специальных гусеничных машин связано с применением гидрообъемных передач (ГОП), позволяющих реализовать параллельные потоки гидравлической и механической мощности. Наиболее современные варианты такой передачи на основе радиально-поршневых гидромашин (РПГ) с шариковыми поршнями успешно используются в зарубежных транспортных средствах [1, 2], а также начинают находить применение в отечественном машиностроении [3, 4].

Конструктивным способом повышения надежности ГОП является техническое диагностирование. Исследований, посвященных изучению динамических процессов в силовых передачах с указанными ГОП, созданию алгоритмов диагностики параметров РПГ с шариковыми поршнями, в настоящее время крайне мало. В статье авторов [5] разработана достаточно полная математическая модель динамических процессов в насосе РПГ, учитывающая инерционные свойства шариков-поршней и статора, упругие свойства столба жидкости в цилиндре управления, эксцентриситет, давления подпитки и в полости нагнетания, частоту вращения ротора.

Целью данной работы является создание на базе указанной модели алгоритма диагностики износа цилиндра-поршневых пар насоса РПГ. В качестве диагностических параметров приняты экспериментальные данные по вибрациям его статора, которые обладают высокой информативностью, простотой получения и обработки [6].

**1. Математическая модель радиального шарико-поршневого насоса ГОП.** На кинематической схеме (рис. 1) показаны: 1 – блок цилиндров (ротор), 2 – поршень-шарик, 3 – цапфенный распределитель, 4 – статорное кольцо, 5 – корпус ГОП, 6 – гидроцилиндр системы управления, 7 – цапфа управления статорного кольца, 8 – ось вращения статорного кольца. Ось вращения ротора проходит через точку  $O$ , а через точки  $O_1$ ,  $O_3$  проходят соответственно ось статорного кольца и ось его вращения (перпендикулярно плоскости рисунка).

Дифференциальное уравнение, описывающее колебания статора, имеет вид [5]

$$I_{O_3z}^{(e)} \ddot{\vartheta} + b_e \dot{\vartheta} + c_e \vartheta = M_{O_3z}^{(0)} + M_{O_3z}(t), \quad (1)$$

где  $\vartheta$  – угол поворота статора;  $I_{O_3z}^{(e)} = \frac{7}{10} mn h^2 + I_{O_3z}^{(s)}$  – эквивалентный момент инерции модели;  $m$  – масса шарика;  $n = 9$  – число цилиндров;  $h$  – расстояние от оси вращения статора до оси ротора;  $I_{O_3z}^{(s)} = I_{O_1z}^{(s)} + m_s \cdot O_3 O_1^2$  – момент инерции статора относительно оси вращения;  $I_{O_1z}^{(s)}$  – момент инерции статора относительно оси статорного кольца;  $m_s$  – масса статора;  $O_3 O_1$  – расстояние от оси статорного кольца до его центра масс;

$c_e = cH^2 - \frac{7}{5}mnh^2\omega^2$  – эквивалентная жесткость;  $c$  – эквивалентный коэффициент

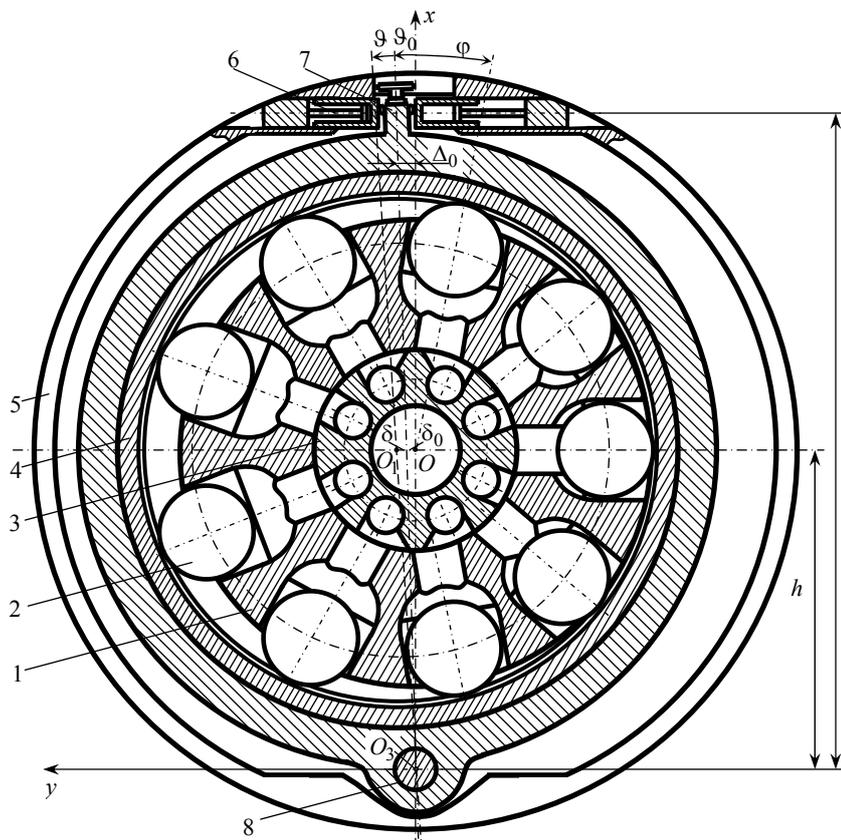


Рис. 1. Кинематическая схема радиально поршневого насоса с шариковыми поршнями.

первую, в направлении хода часовых стрелок.

**2. Алгоритм диагностики забросов давления цилиндрических пар насоса РПГ.** В законе изменения давления в подпоршневом пространстве шарика-поршня на интервале одного оборота ротора насоса, формирующего возмущающий момент  $M_{O_{3z}}$  математической модели (1), для кривой заброса давления обоснована двухпараметрическая зависимость [5]. В качестве параметров рассматриваются интервал действия импульса по углу поворота ротора  $\Delta\varphi$  и его максимальное значение  $\Delta p$  (рис. 2). Для конкретного насоса указанный интервал определяется его геометрией. На уровень же забросов давления, зависящих от частоты вращения ротора, нагрузки на ГОП, существенно могут влиять утечки, обусловленные чрезмерным износом шариков и стенок цилиндров. В основу разрабатываемого алгоритма положен экспериментально подтвержденный факт о связи между забросами давления и колебаниями статора насоса вокруг оси вращения.

Представим давление  $p(\varphi)$  для первого цилиндра в виде суммы

$$p(\varphi) = p_1(\varphi) + \eta p_2(\varphi), \quad (2)$$

где  $p_1(\varphi)$  – давление без учета забросов;  $p_2(\varphi)$  – давление заброса при отсутствии износа;  $\varphi$  – угол поворота ротора ( $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ );  $\eta$  – параметр износа – характеризует уровень заброса давления ( $0 \leq \eta \leq 1$ );  $p_h$  – давление в полости нагнетания;  $p_d$  – давление подпитки;  $\Delta p$  – величина заброса давления.

Значение  $\eta = 1$  соответствует отсутствию износа; значение  $\eta = 0$  – предельному

упругости жидкости в гидроцилиндре управления;  $H$  – расстояние от оси вращения статора до оси гидроцилиндра управления;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора;

$$M_{O_{3z}}^{(0)} = \frac{7}{5}mnh^2\vartheta_0\omega^2 -$$

постоянный момент, обусловленный движением шариков;  $\vartheta_0$  – исходное отклонение статора;  $b_e$  – эквивалентный коэффициент сопротивления;  $M_{O_{3z}}(t)$  – возмущающий момент, обусловленный силами давления жидкости в подпоршневом пространстве.

Полагаем, что угол поворота  $\varphi$  ротора отсчитывается от вертикального положения цилиндрической пары, условно принимаемой за

износу. Большой наглядностью обладает параметр  $\xi = (1 - \eta) \cdot 100\%$ , который целесообразно назвать степенью износа.

Теперь, следуя [5], возмущающий момент от первого цилиндра на одном обороте ротора можно представить в виде

$$M_{O_{3z}}^{(\varphi)} = q_1(\varphi) + \eta q_2(\varphi), \quad (3)$$

где  $q_1(\varphi) = \frac{\pi \cdot 2}{\cos \psi} (x \sin(\varphi + \psi) - y \cos(\varphi + \psi)) p_1(\varphi)$ ;  $q_2(\varphi) = \frac{\pi \cdot 2}{\cos \psi} (-x \sin(\varphi + \psi) + y \cos(\varphi + \psi)) p_2(\varphi)$ ;

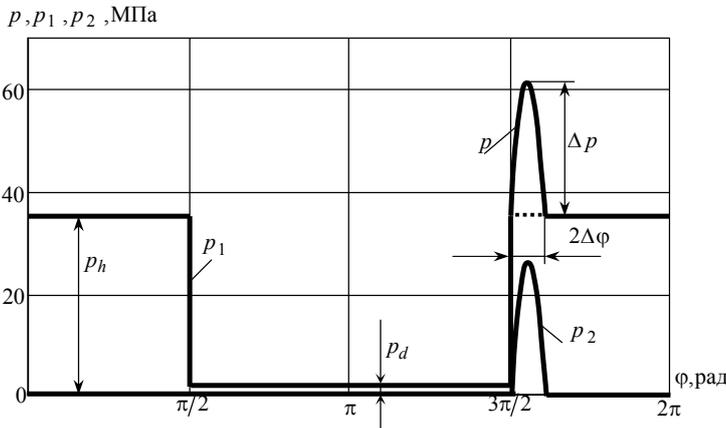


Рис. 2. Зависимость давления в подпоршневом пространстве от угла поворота ротора.

$$x = h + \rho \cos(\varphi) + r \cos(\varphi + \psi);$$

$$y = -(\rho \sin(\varphi) + r \sin(\varphi + \psi));$$

$r$  – радиус шарика;  $\rho = R_0 - \delta_1 \sin \varphi$ ;  $R_0$  – радиус окружности, по которой движутся центры шариков;  $\delta_1 = \delta_0 + \delta$  (рис. 1);  $\psi = \frac{\delta_1}{R_0} \cos \varphi$ .

Для  $\rho$  и  $\psi$  здесь приведены приближенные выражения с точностью до малых первого порядка.

Представим приближенно возмущающий момент от первого цилиндра конечным тригонометрическим рядом, разложив выражение (3) в ряд Фурье

$$M_1(\varphi) = M_{O_{3z}}^{(\varphi)} = \sum_{i=1}^v (b_{c_i}^{(1)} \cos i\varphi + b_{s_i}^{(1)} \sin i\varphi) + \eta_1 \sum_{i=1}^v (a_{c_i}^{(1)} \cos i\varphi + a_{s_i}^{(1)} \sin i\varphi),$$

где  $b_{c_i}^{(1)}$ ,  $b_{s_i}^{(1)}$  – косинусная и синусная амплитуда  $i$ -ой гармоники в разложении в ряд Фурье  $p_1(\varphi)$ ;  $a_{c_i}^{(1)}$ ,  $a_{s_i}^{(1)}$  – косинусная и синусная амплитуда  $i$ -ой гармоники в разложении в ряд Фурье  $p_2(\varphi)$ ;  $v$  – число регистрируемых гармоник.

Тогда для момента от  $k$ -го цилиндра имеем соответственно

$$M_k(\varphi) = \sum_{i=1}^v (b_{c_i}^{(1)} \cos i\tilde{\varphi}_k + b_{s_i}^{(1)} \sin i\tilde{\varphi}_k) + \eta_k \sum_{i=1}^v (a_{c_i}^{(1)} \cos i\tilde{\varphi}_k + a_{s_i}^{(1)} \sin i\tilde{\varphi}_k),$$

где  $\tilde{\varphi}_k = \varphi - \gamma_k$ ;  $\gamma_k = (k-1) \frac{2\pi}{\omega n}$  – сдвиг по фазе  $k$ -го возмущающего момента ( $k = \overline{1, n}$ ).

С учетом выражения для  $\tilde{\varphi}_k$  последняя формула приобретает окончательный вид

$$M_k(\varphi) = \sum_{i=1}^v (b_{c_i}^{(k)} \cos i\varphi + b_{s_i}^{(k)} \sin i\varphi) + \eta_k \sum_{i=1}^v (a_{c_i}^{(k)} \cos i\varphi + a_{s_i}^{(k)} \sin i\varphi), \quad (4)$$

где  $b_{c_i}^{(k)} = b_{c_i}^{(1)} \cos i\gamma_k - b_{s_i}^{(1)} \sin i\gamma_k$ ,  $b_{s_i}^{(k)} = b_{c_i}^{(1)} \sin i\gamma_k + b_{s_i}^{(1)} \cos i\gamma_k$ ;  
 $a_{c_i}^{(k)} = a_{c_i}^{(1)} \cos i\gamma_k - a_{s_i}^{(1)} \sin i\gamma_k$ ,  $a_{s_i}^{(k)} = a_{c_i}^{(1)} \sin i\gamma_k + a_{s_i}^{(1)} \cos i\gamma_k$ .

Амплитуды косинусных и синусных гармонических составляющих в движении статора насоса принятой диагностической модели, которые получаются на ос-

нове экспериментальных данных, обозначим соответственно через  $\mathcal{G}_{c_i}$ ,  $\mathcal{G}_{s_i}$  ( $i = \overline{1, v}$ ).

Для построения системы линейных алгебраических уравнений по определению параметров  $\eta_k$  ( $k = \overline{1, n}$ ) воспользуемся гармоническими коэффициентами влияния. Косинусную и синусную амплитуды колебаний статора от момента единичной амплитуды  $\sin i\omega t$  обозначим соответственно через  $\alpha_{c_i}^{(s)}$  и  $\alpha_{s_i}^{(s)}$ , а от момента единичной амплитуды  $\cos i\omega t$  – соответственно через  $\alpha_{c_i}^{(c)}$  и  $\alpha_{s_i}^{(c)}$ .

Для рассматриваемой модели (1) выражения для них получаются на основании известных формул для амплитуды и фазы вынужденных колебаний осциллятора с линейно-вязким сопротивлением [7]

$$\alpha_{c_i}^{(s)} = -\alpha_{s_i}^{(c)} = -\frac{2\beta i\omega}{W}; \quad \alpha_{s_i}^{(s)} = \alpha_{c_i}^{(c)} = \frac{\omega_0^2 - (i\omega)^2}{W}, \quad (5)$$

где  $\omega_0^2 = \frac{c_e}{I_{O3z}^{(e)}}$ ,  $\beta = \frac{b_e}{2I_{O3z}^{(e)}}$ ,  $W = I_{O3z}^{(e)} \left[ (\omega_0^2 - (i\omega)^2)^2 + 4\beta^2 (i\omega)^2 \right]$ .

С помощью формул (4), (5) запишем выражения для амплитуд косинусных и синусных составляющих каждой гармоники в реакции статора от соответствующих гармоник возмущения и приравняем их экспериментальным значениям гармоник того же порядка. После несложных преобразований имеем:

$$\left. \begin{aligned} & \left( \alpha_{c_i}^{(c)} a_{c_i}^{(1)} + \alpha_{c_i}^{(s)} a_{s_i}^{(1)} \right) \eta_1 + \left( \alpha_{c_i}^{(c)} a_{c_i}^{(2)} + \alpha_{c_i}^{(s)} a_{s_i}^{(2)} \right) \eta_2 + \dots + \left( \alpha_{c_i}^{(c)} a_{c_i}^{(n)} + \alpha_{c_i}^{(s)} a_{s_i}^{(n)} \right) \eta_n = \\ & = \mathcal{G}_{c_i} - \alpha_{c_i}^{(c)} \sum_{k=1}^n b_{c_i}^{(k)} - \alpha_{c_i}^{(s)} \sum_{k=1}^n b_{s_i}^{(k)}, \\ & \left( \alpha_{s_i}^{(c)} a_{c_i}^{(1)} + \alpha_{s_i}^{(s)} a_{s_i}^{(1)} \right) \eta_1 + \left( \alpha_{s_i}^{(c)} a_{c_i}^{(2)} + \alpha_{s_i}^{(s)} a_{s_i}^{(2)} \right) \eta_2 + \dots + \left( \alpha_{s_i}^{(c)} a_{c_i}^{(n)} + \alpha_{s_i}^{(s)} a_{s_i}^{(n)} \right) \eta_n = \\ & = \mathcal{G}_{s_i} - \alpha_{s_i}^{(c)} \sum_{k=1}^n b_{c_i}^{(k)} - \alpha_{s_i}^{(s)} \sum_{k=1}^n b_{s_i}^{(k)}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $i = i_1, i_2, \dots, i_v$  – номера регистрируемых гармоник вибрационного сигнала.

Систему линейных алгебраических уравнений (6) перепишем в матричной форме

$$A\eta = b, \quad (7)$$

где  $A$  – матрица размерности  $2v \times n$  ( $v \geq 5$ );  $\eta = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n]^m$  – вектор диагностируемых параметров;  $b = [b_1, b_2, \dots, b_{2v}]^m$  – вектор правых частей ( $m$  – знак транспонирования).

Поскольку экспериментальные данные определяются неточно, систему (7) заменим системой так называемых условных уравнений

$$A\eta = \tilde{b}, \quad (8)$$

где  $\tilde{b}$  – приближенное значение вектор правых частей.

Число уравнений  $2v$  может быть больше числа неизвестных, в этом случае система (8) является переопределенной. Самым распространенным способом решения таких систем линейных алгебраических уравнений является метод наименьших квадратов, в котором в качестве решения берется вектор  $\tilde{\eta}$ , минимизирующий норму невязки

$$\|A\tilde{\eta} - \tilde{b}\| = \inf \|A\eta - \tilde{b}\|$$

на всем пространстве решений системы (8). В качестве нормы вектора принята ве-

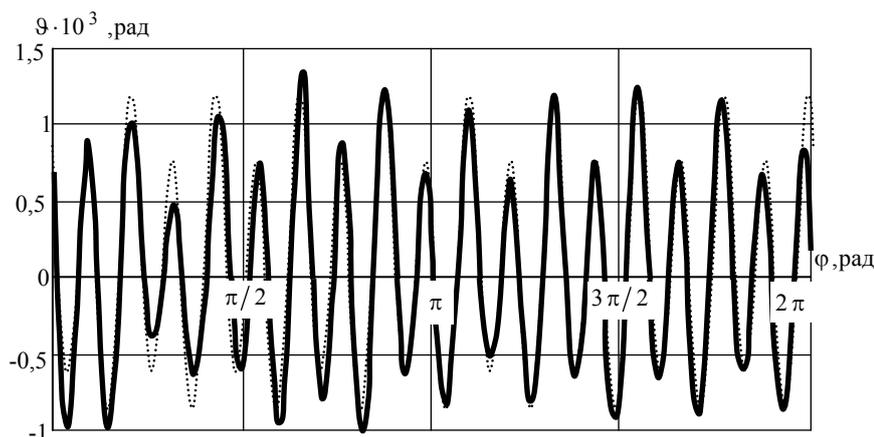


Рис. 3. Зависимость угла поворота статора от угла поворота ротора при увеличенных зазорах в третьем цилиндре ( $\xi = 25\%$ ).

аппаратуре. Однако в условиях эксплуатации отклонения параметров начинаются в одном реже двух, трех цилиндрах. В этом случае систему уравнений (6) можно привести соответственно к одному, двум или трем уравнениям. Решение задачи даст набор цилиндров, обеспечивающий минимум соответствующей невязки.

На рис. 3, 4 в качестве диагностических данных представлены результаты рас-

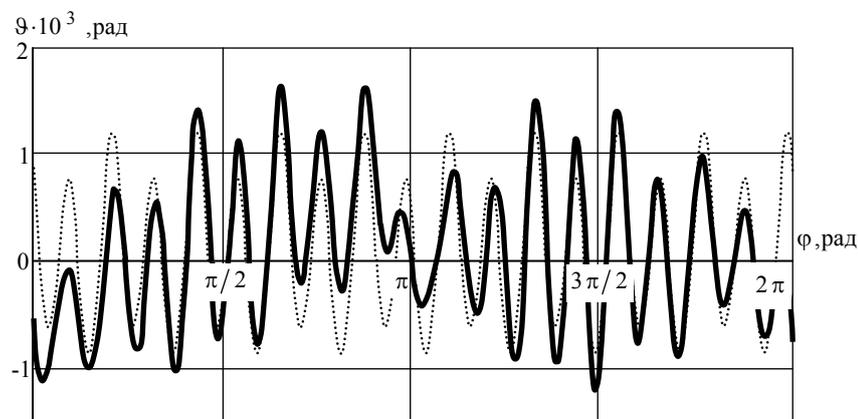


Рис. 4. Зависимость угла поворота статора от угла поворота ротора при отключении третьего цилиндра ( $\xi = 100\%$ ).

износа третьего цилиндра, чем подтвердили эффективность предложенного подхода.

**Выводы.** 1. Впервые создан алгоритм диагностики износа цилиндропоршневых пар насоса РПГ с шариковыми поршнями. 2. Предложены параметры характеризующие износ цилиндропоршневых пар. 3. Выбран тип экспериментальных данных, необходимых для диагностики, которые обладают высокой информативностью, простотой получения и обработки. 4. Предложенный алгоритм имеет значительные перспективы для решения широкого круга проблем диагностики ГОП с шариковыми РПГ.

**Литература:** 1. НМРТ-1250. Компактная трансмиссия для AFAS/FARV. Transmission Pro-

личина  $\|b\| = \left( \sum_{i=1}^{2v} b_i^2 \right)^{1/2}$ .

Тогда вектор решения определяется так:

$$\tilde{\eta} = (A^m A)^{-1} A^m \tilde{b}.$$

При одновременной диагностике всех цилиндропоршневых пар необходимо регистрировать экспериментальную информацию с достаточно высокой точностью, что предъявляет повышенные требования к аппаратуре.

расчетов установившихся колебаний статора при наличии в третьем цилиндре насоса РПГ износа  $\xi$  соответственно 25% и 100% (цилиндр отключен). Точечные графики на этих рисунках соответствуют насосу, все цилиндры которого имеют номинальные параметры. Математические эксперименты с разработанным алгоритмом позволили “восстановить” указанные значения степени

grams Defence Systems Martin Marietta.– 1993. 2. Динамика транспортно-тяговых колесных и гусеничных машин / Александров Е.Е., Волонцевич Д.О., Карпенко В.А. и др.– Харьков: Изд-во ХГАДТУ (ХАДИ).– 2001.– 642 с. 3. Борисюк М.Д., Бусяк Ю.М., Аврунин Г.А. и др. Новое поколение шарико-поршневых передач // Промислова гідравліка і пневматика.– 2003.– №1.– С. 66-70. 4. Климов В.Ф., Ярмач Н.С., Истратов А.В. Техническое обеспечение исследований объемных гидромашин с шаровыми поршнями, расширение диагностических параметров и их информативности // Механіка та машинобудування.– 2003.– №1.– С. 201-208. 5. Шатохин В.М., Зайцев А.И. Об исследовании динамических процессов в радиально-поршневом насосе гидрообъемной передачи с шариковыми поршнями // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.– Харків: НТУ “ХПІ”.– 2005.– № 22.– С. 97-106. 6. Ярмач Н.С. Исследование динамических процессов гидромашин объемного типа, диагностика и идентификация дефектов // Механіка та машинобудування.– 2004.– №1.– С. 35-45. 7. Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики. В 2-х томах. Т. II. Динамика.– М.: Наука, 1983.– 640 с.

**УДК 621.432**

## **СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ВАЛА ТОПЛИВНОГО НАСОСА ДВИГАТЕЛЯ 470-1М**

**Шатохин В.М.**, докт. техн. наук, **Зайцев А.И.**, докт. фарм. наук,  
**Кутовая О.В.**, канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)

*Results of design-experiment researches about driving gear parameter synthesis of fuel pump diving shaft for engine 470-1M, which supports permissible level of dynamic load, are stated. Reasons of intensive basic and subharmonic oscillations on engine working conditions are revealed. Dynamic processes for different driving gear parameters and constructions with taking into account technological gap are investigated. Diameter of spring that supports the largest lowering of maximum elastic moment is determined.*

**Введение.** Характерной особенностью привода распределительного вала топливного насоса V-образного дизеля 470-1М мощностью 1100 кВт (1500 л.с.) является наличие сложного периодического возбуждения и технологических зазоров в зубчатых зацеплениях. Как показали эксперименты при доводочных испытаниях двигателя, указанные факторы порождают не только основные резонансы с разными гармониками, но и разнообразные субгармонические колебания значительной интенсивности, которые являются причиной поломок шестерен. Известные подходы по анализу динамических нагрузок в силовых передачах машин с ДВС [1, 2] не позволяют объяснить природу последних и тем более не содержат аппарата для их изучения. В статье построена модель привода и предложен эффективный аппарат ее исследования, что позволило выявить причины возникновения опасных динамических нагрузок и дать рекомендации по выбору параметров устройства, обеспечивающих их снижение. Приведены результаты экспериментальных исследований.

**1. Модель привода распределительного вала.** Кинематическая схема привода представлена на рис. 1. Анализ упругих и инерционных характеристик элементов привода с учетом податливости зубьев шестерен и опор показал, что его динамические свойства на рабочих режимах достаточно хорошо отражает модель, показанная на рис. 2. Значения параметров модели, приведенные к распределительному валу, следующие:  $I_1 \div I_3 = 0,0026 \text{ кгм}^2$ ;  $I_4 \div I_6 = 0,0032 \text{ кгм}^2$ ;  $I_7 = 0,0056 \text{ кгм}^2$  (1-й вариант);  $I_7 = 0,0159 \text{ кгм}^2$  (2-й вариант);  $c_1 = 5,83 \cdot 10^4 \text{ Нм}$ ;  $c_2 = c_3 = 1,26 \cdot 10^5 \text{ Нм}$ ;  $c_4 = 3,45 \cdot 10^4 \text{ Нм}$ ;  $c_5 = c_7 = 1,52 \cdot 10^5 \text{ Нм}$ . Жесткость упоров в нелинейной характеристике



Рис. 1. Кинематическая схема привода.

характеристике определяется приведенной крутильной жесткостью торсионного вала. Для вала диаметром 15 мм  $c_6 = 6,73 \cdot 10^3$  Нм. Экспериментальное значение зазора  $d_6 = 0,02618$  рад ( $1,5^0$ ).

Так как данные о характере и величине демпфирования отсутствовали, то был произведен подбор коэффициента линейного демпфирования путем сопоставления расчетных значений упругих моментов при различном демпфировании с экспериментальными резонансными моментами для  $c_6 = 6,73 \cdot 10^3$  Нм. В приводе с  $I_7 = 0,0056$  кгм<sup>2</sup> он осуществлялся на резонансе с преобладающей второй гармоникой (100% мощности двигателя), а с  $I_7 = 0,0159$  кгм<sup>2</sup> – на резонансе с преобладающей первой

гармоникой (50% мощности двигателя). В обоих случаях удовлетворительное совпадение было получено при  $\beta_1 \div \beta_6 = 0$ ;  $\beta_7 = 0,8$  кгм<sup>2</sup>с<sup>-1</sup>.

Возмущающий момент  $M_7(t)$  носит сложный негармонический характер. Экспериментально полученная для него форма имеет вид треугольного импульса (рис. 3, а). За один оборот распределительного вала происходит шесть всплесков указанной формы. Особенность возмущения состоит в том, что высота импульса

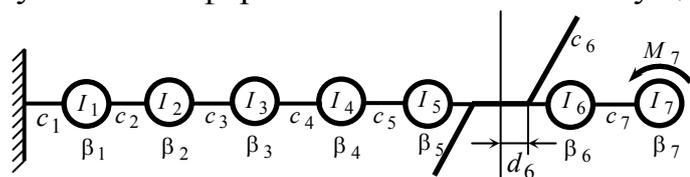


Рис. 2. Механическая модель привода.

$M(\omega)$  линейно зависит от оборотов (частоты) и изменяется по линейному закону  $a\omega + b$ , параметры которого определяются мощностью, снимаемой с двигателя. Результаты обработки экспериментальных данных приведены на

рис. 3, б. Прямые 1, 2, 3 отвечают соответственно 100%, 50% и 0% мощности. Значения параметров  $a$  и  $b$  приведены в табл. 1.

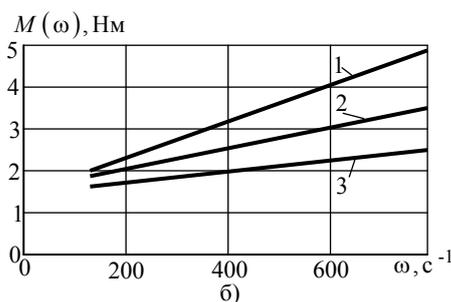
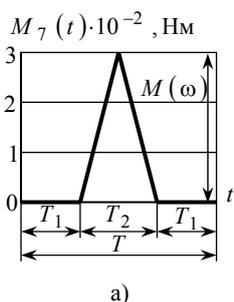


Таблица 1

Параметры возбуждения			
	Мощность		
	100%	50%	0%
$a, \text{Нмс}^{-1}$	0,455	0,283	0,154
$b, \text{Нм}$	114	137	120

Рис. 3. Возбуждение в приводе: а) – возмущающий момент на периоде; б) – экспериментальные зависимости  $M(\omega)$ .

**2. Математический аппарат исследования установившихся динамических процессов в нелинейных силовых передачах.** Особенностью большинства моделей машинных агрегатов с ДВС является то, что число нелинейных элементов технологического и конструктивного характера в них существенно меньше числа степеней свободы. Известно, что в таких случаях уравнения движения целесообразно записывать в интегральной форме с использованием импульсно-частотных характеристик (ИЧХ) линеаризованных моделей [3, 4]. Число уравнений оказывается равным числу

нелинейностей, а трудоемкость решения задачи, практически не зависящей от числа степеней свободы системы, что существенно при решении задач синтеза и оптимизации.

В матричной форме нелинейные интегральные уравнения периодических колебаний записываются в виде [3, 4]

$$y(t) = \int_0^T \Phi(t - \tau) f(y) d\tau + g(t), \quad (1)$$

где  $y(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_s(t)]^T$  – вектор улов закручивания нелинейных соединений ( $T$  – знак транспонирования);  $s$  – число нелинейностей;

$\Phi(t - \tau) = [\varphi_{i,j}(t - \tau)] \quad (i, j = \overline{1, s})$  – матрица ИЧХ;  $f(y) = [f_1(y_1), f_2(y_2), \dots, f_s(y_s)]^T$  – нелинейная вектор-функция;  $f_j(y_j) = c_j y_j - F_j(y_j)$ ;  $F_j(y_j)$  – нелинейная характеристика  $j$ -го нелинейного соединения;  $c_j, c_j y_j$  – соответственно коэффициент жесткости и упругий момент в линеаризованном соединении;

$g(t) = [g_1(t), g_2(t), \dots, g_s(t)]^T$  – вектор-функция реакций на внешнее возмущение линеаризованных нелинейных соединений;  $g_j(t) = \sum_{i=1}^k \int_0^T \psi_{j,i}(t - \tau) M_i(\tau) d\tau$ ;  $M_i(\tau)$

$(i = \overline{1, k})$  – возмущающие моменты ( $k$  – число моментов;  $T$  – период колебаний);  $\psi_{j,i}(t - \tau)$  – соответствующие ИЧХ.

При решении уравнения (1) хорошо зарекомендовал себя итерационный метод Ньютона-Канторовича решения операторных уравнений, формулы которого в данном случае имеют вид [3, 4]:

$$y_{n+1}(t) = y_n(t) - z_n(t); \quad (2)$$

$$z_n(t) - \int_0^T \Phi(t - \tau) f'_y(y_n) z_n(\tau) d\tau = -1_n(t); \quad (3)$$

$$1_n(t) = \int_0^T \Phi(t - \tau) f(y_n) d\tau + g(t) - y_n(t) \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad (4)$$

где  $f'_y = \text{diag} \left\{ f'_{y_1}, f'_{y_2}, \dots, f'_{y_s} \right\}$  – диагональная матрица.

В работах [3, 4] изложены эффективные численные алгоритмы реализации формул (2) - (4).

**3. Результаты расчетно-экспериментальных исследований.** Для оценки динамических нагрузок в приводе проводились стендовые экспериментальные исследования двигателя, при этом на осциллограммах регистрировались упругие моменты на торсионном валу и угловая скорость распределительного вала. Данные по экспериментам с валом диаметра 15 мм ( $c_6 = 6,73 \cdot 10^3$  Нм) использовались, в частности, для проверки достоверности принятой модели и подбора эквивалентного коэффициента демпфирования (см. п. 2). Затем расчетным путем исследовалось влия-

ние диаметра вала и некоторых других параметров привода на уровень динамических нагрузок.

Для модели с  $I_7 = 0,0159 \text{ кгм}^2$  (вариант 2 – с дополнительными маховиками)

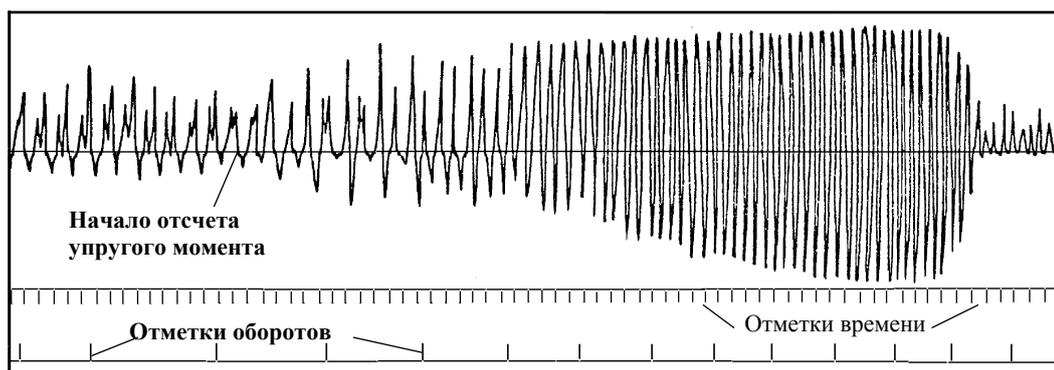


Рис. 4. Экспериментальные упругие моменты на торсионном валу.

сопоставимые экспериментальные и расчетные упругие моменты представлены на рис. 4, 5. Угловая частота кулачкового вала лежит в интервале  $325 \div 750 \text{ с}^{-1}$ ; масштабный ко-

эффициент  $\mu = 9,6 \text{ Нм/мм}$ . Характерные кривые упругих моментов, приведенных к торсионному валу, построены для некоторых значений частот так, чтобы можно было проследить за их изменением, вызванным изменением частоты возбуждения (оборотов) в рабочем диапазоне. Сравнение результатов расчетов и экспериментов показывает их хорошее качественное и количественное совпадение, особенно, если учесть то обстоятельство, что во избежания разрушения шестерен в последнем слу-

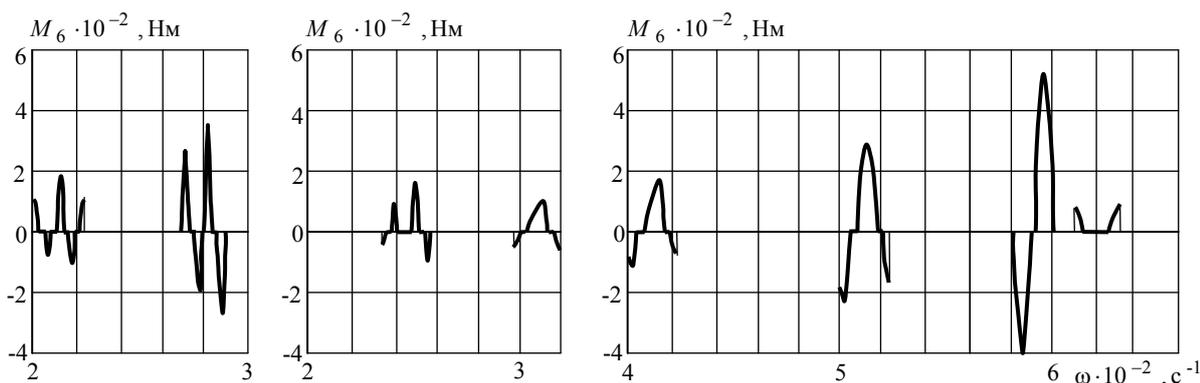


Рис. 5. Расчетные упругие моменты на торсионном валу.

чае проход через резонанс был осуществлен достаточно быстро. Для указанного варианта построена зависимость максимальных углов закручивания от частоты возбуждения (рис. 6). Цифрами 1 и 2 отмечены диапазоны частот основных колебаний, на которых преобладают соответственно первая и вторая гармоники, цифрой 3 –

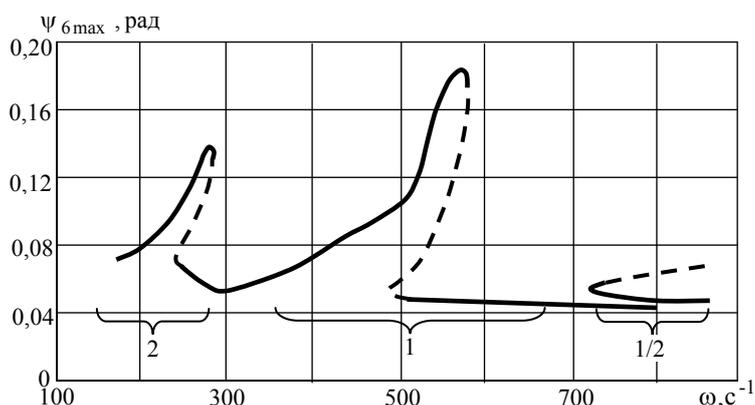


Рис. 6. Максимальные значения углов закручивания.

диапазон, в котором развиваются субгармонические колебания.

Наиболее простым с точки зрения реализации способом снижения динамических нагрузок является выведение резонансных частот из рабочего диапазона системы. Практически это легко реализовать изменением диаметра торсионного вала. При доводке привода частоты свободных колебаний можно умень-

шить также присоединением дополнительных масс к распределительному валу. Расчетное исследование влияния диаметра торсионного вала на уровень максимальных упругих моментов было осуществлено для валов диаметром 15 мм ( $c_6 = 6,73 \cdot 10^3$  Нм), 20 мм ( $c_6 = 2,13 \cdot 10^4$  Нм), 30 мм ( $c_6 = 1,08 \cdot 10^5$  Нм) (рис. 7). Рассмотрение графиков позволяет сделать заключение о том, что увеличение диаметра вала приводит к увеличению максимальных упругих моментов. Расчеты в то же время показывают, что уровень колебаний при этом снижается. Исследуемые колебания имеют достаточно сложный характер и существенно отличаются от гармонических, что иллюстрирует рис. 8, где представлен закон изменения угла закручивания нелинейного соединения на интервале периода для вала диаметра 20 мм ( $\omega = 400 \text{ с}^{-1}$ ).

В проведенных расчетах оценивалось также влияние дополнительного среднего момента в возбуждении на характер динамических процессов в приводе. Они, однако, показали, что максимальные упругие моменты на валу для среднего момента, который может быть практически реализован, возрастают незначительно.

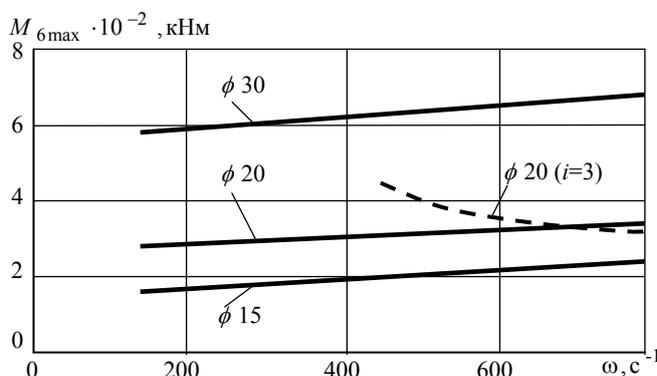


Рис. 7. Максимальные упругие моменты.

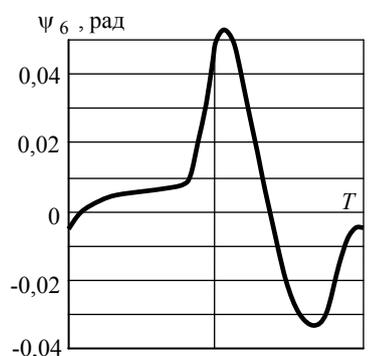


Рис.8. Угол закручивания на периоде.

Присоединение дополнительных масс к распределительному валу ( $I_7 = 0,0159 \text{ кгм}^2$ ) рассматриваемой модели качественно эквивалентно уменьшению диаметра торсионного вала. Резонансная зона с преобладающей первой гармоникой при этом полностью перемещается в рабочий диапазон (рис. 4,5), причем максимальные упругие моменты достигают значительного уровня ( $M_{6max} > 400$  Нм), как и резонансные колебания со второй гармоникой. Кроме того, в конце рабочего диапазона экспериментально обнаружены устойчивые субгармонические колебания второго порядка ( $\omega = 738 \text{ с}^{-1}$ ). Выявлены следующие особенности этих колебаний: они возбуждались только при нагрузке на двигатель 50% (рис. 9), с увеличением ее исчезали (рис. 10); для них характерны односторонние удары по упорам.

Это явление исследовалось и расчетным путем. Наименьшее значение частоты возбуждения  $\omega$ , на которой обнаружены субгармонические колебания, равно  $720 \text{ с}^{-1}$ . Были не только подтверждены субгармоники с односторонними ударами, но, начиная с указанного значения частоты, обнаружены также и неустойчивые субгармонические колебания с выходами на оба упора (см. рис. 6). Расчеты подтвердили, что на частоте  $\omega = 738 \text{ с}^{-1}$  при увеличении нагрузки до 75% субгармонические колебания исчезают, а при уменьшении мощности до 0% – сохраняются.

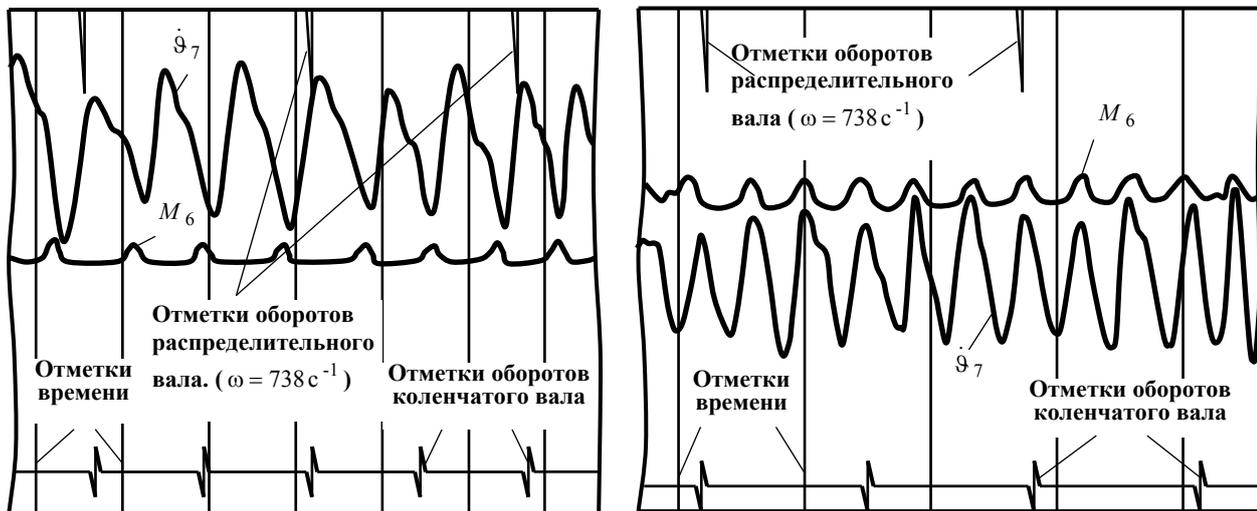


Рис. 9. Субгармонические колебания (50% мощности).

Расчетным путем исследовалась также возможность снижения максимальных упругих моментов на торсионном валу за счет увеличения зазора, который брался практически таким, чтобы в системе реализовывались односторонние удары. Параметры системы были несколько изменены по сравнению с рассмотренными выше. В связи с предполагаемой заменой шестерен на более прочные для момента инерции  $I_7$  бралось большее значение момента инерции –  $0,063 \text{ кгм}^2$ . Рассматривался вал диаметром 20 мм, однако, изменение передаточного отношения между шестерней торсионного вала и связанной с ней шестерней распределительного вала с  $i=2$  до  $i=3$  (передаточное отношение между коленчатым и распределительным валами сохранялось неизменным) приведенная жесткость (жесткость упоров в нелинейности) была доведена до  $c_6 = 6,5 \cdot 10^4 \text{ Нм}$ . Результаты расчетов максимальных упругих моментов представляет штриховая кривая на рис. 7. Сравнение ее с другими графиками этого рисунка показывает, что произведенные изменения параметров не принесли желаемого эффекта. Этот путь неприемлем и из-за значительной величины размахов колебаний, что может нарушить характер протекания теплового процесса в двигателе. В частности, на частоте  $\omega = 440 \text{ с}^{-1}$  размах достигает  $0,136 \text{ рад}$ .

**Выводы.** 1. Увеличение диаметра торсионного вала приводит к возрастанию максимальных упругих моментов. 2. Увеличение момента инерции распределительного вала, снижающее частоты свободных колебаний, перемещает резонансные колебания в рабочий диапазон, причем при определенной нагрузке становятся возможными субгармонические колебания. 3. Изменение дополнительного среднего момента в реальных пределах несущественно сказывается на максимальных упругих моментах. 4. Реализация односторонних выходов на упор не позволяет достичь необходимого снижения динамических нагрузок в приводе. 5. наибольшее снижение максимальных упругих моментов удастся достичь при использовании рессоры диаметром 15 мм, что в сочетании с более прочными шестернями обеспечивает необходимую надежность привода.

**Литература:** 1. Терских В.П. Крутильные колебания валопровода силовых установок, т. 1.– Л.: Судостроение. 1969.–208 с. 2. Вейц В.Л., Кочура А.Е. Динамика машинных агрегатов с двига-

телями внутреннего сгорания.– Л.: Машиностроение. 1978.– 352 с. 3. Шатохин В. Застосування інтегральних рівнянь при дослідженні сталих динамічних процесів у нелінійних моделях машинних агрегатів // Машинознавство.– 2002.– №4 (58).– С. 20-25. 4. Шатохин В.М. Решение нелинейных интегро-дифференциальных уравнений периодических колебаний силовых передач машин с использованием ДПФ // Вестник ХГПУ.– Харьков: ХГПУ.– 1998.– Вып. 29.– С. 15-26.

**УДК.62.762**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ НАГРУЖЕНИЯ СИЛОВОГО РЕДУКТОРА ЧИСТОВОЙ КЛЕТИ НЕПРЕРЫВНОГО ТОНКОЛИСТОВОГО СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ «1680»**

**Гапонов В.С.**, докт. техн. наук, **Музыкин Ю.Д.**, канд. техн. наук,

**Столбовой А.С.**, канд. техн. наук, **Татьков В.В.**, канд. техн. наук,

**Вышнивецкий С.М.**, **Телюк Д.В.** (г. Харьков, г. Запорожье, Украина)

*The empirical-formula dependence of change of a torque in time is obtained, which one allows to determine duration of operating of different loads applied (put) to the reduction gearbox.*

Повышение надежности работы высокотехнологического оборудования возможно лишь при всестороннем учете всех эксплуатационных факторов, влияющих на эффективность работы, как отдельных элементов, так и всей системы в целом. Чем сложнее функциональное назначение каждого отдельного элемента и чем их больше содержит система, тем больше вероятность возникновения отказов при отклонении эксплуатационных параметров от их номинального значения.

Одним из характерных примеров высокотехнологического оборудования является непрерывный тонколистовой стан горячей прокатки «1680» установленный в ЦППТЛ Запорожского металлургического комбината «Запорожсталь». Результаты наблюдений за надежностью работы отдельных механических элементов стана в период с 1998 г. по 2004 г. показали высокую частоту выхода из строя силового редуктора рабочей клетки № 5 чистой группы, что приводит к остановке стана и неоправданным экономическим потерям. Анализ причин выхода из строя силового редуктора показал, что наиболее серьезные отказы связаны с усталостным разрушением зубьев вал-шестерни, которые обусловлены деформацией изгиба.

С целью исключения аварийных ситуаций на стане по причине отказов силового редуктора клетки № 5 были изучены условия его нагружения с фиксацией в качестве интегрального показателя крутящего момента на ведущем валу. Для получения объективного показателя исследуемого параметра была рассмотрена репрезентативная выборка, включающая в себя непрерывную работу клетки № 5 НТЛС «1680» в течение 5 дней. Выборка является случайной, т.к. вероятность ее образования из генеральной совокупности имеет равную возможность с другими выборками.

Анализ проводился по параметру крутящего момента на валу электродвигателя AMZ1600GF12MSBA, который непосредственно соединен с вал-шестерней редуктора, и фиксируется на диаграмме в реальном режиме времени. Обработка результатов измерений выполняется методами математической статистики.

В качестве исходных данных было установлено, что границы изменения крутящего момента лежат в пределах  $T_{\min} = 40$  кНм;  $T_{\max} = 165$  кНм. С учетом точности измерения, а также возможностей расшифровки принято 5 интервалов с шагом 25 кНм.

В качестве исходных данных было установлено, что границы изменения крутящего момента лежат в пределах  $T_{\min} = 40$  кНм;  $T_{\max} = 165$  кНм. С учетом точности измерения, а также возможностей расшифровки принято 5 интервалов с шагом 25 кНм.

I интервал	40-65 кНм
II интервал	65-90 кНм
III интервал	90-115 кНм
IV интервал	115-140 кНм
V интервал	140-165 кНм.

Для каждого интервала произведен подсчет частот и частостей эмпирического распределения и построена гистограмма распределения непрерывной случайной величины крутящего момента и длительности работы на каждом интервале (рис. 1). Длительность работы на каждом интервале нагружения определялась в предположении, что возможность появления каждого импульса равновероятна и временной интервал их следования постоянен и равен 40,97 с. Такое предположение обосновано, т.к. исследуемая выборка включала 10550 независимых измерений за достаточно длительный промежуток времени в 120 часов.

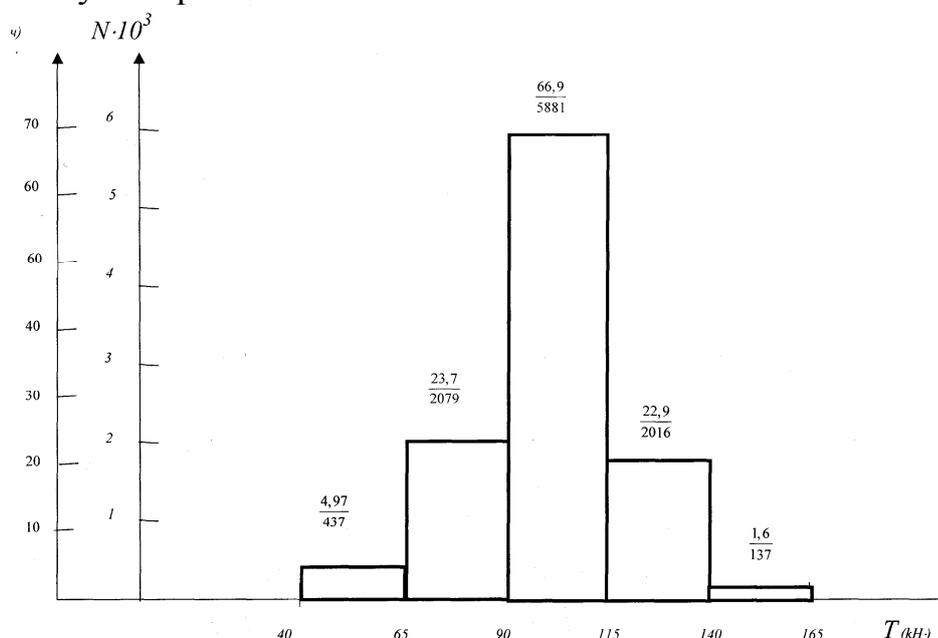


Рис.1. Эмпирическая гистограмма распределения крутящего момента и длительности работы на каждом интервале.

Из рассмотрения гистограммы с учетом того, что непрерывная случайная величина крутящего момента является функцией большого числа взаимно независимых параметров, таких как температура сляба, марка катаемой стали, геометрические параметры листа и т.д., согласно теореме Ляпунова следует, что исследуемый крутящий момент подчиняется нормальному закону распределения. Это позволяет провести обработку статистических данных и определить характеристики эмпирического распределения.

Произведем сопоставление эмпирического распределения с теоретическим нормальным. Так как рассматриваемая выборка является репрезентативной можно принять, что среднее арифметическое значение случайной величины и ее среднее

квадратическое отклонение для генеральной совокупности и для рассматриваемой выборки одинаковые, т.е.  $\bar{X}_0 \approx \bar{X}$ ;  $\sigma_0 \approx S$ . Тогда

$$\bar{X} = \frac{\sum f_i X_i}{n}; \quad S = \sqrt{\frac{\sum f_i (X_i - \bar{X})^2}{n}},$$

где  $X_i$  - середина интервала;  $f_i$  - частота эмпирического распределения;  $n$  - суммарное число проведенных измерений.

По результатам расчета:  $\bar{X} = 101$  кнм;  $S = 19,4$  кнм.

Для возможности сопоставления составим вспомогательную табл. 1.

Таблица 1

X		$X_i$	$f_i$	$t_i$	$Z_i$	$f' = \frac{nc}{S} Z_i$
От	до					
40	65	52,5	437	2,5	0,0175	238
65	90	77,5	2079	1,21	0,1919	2609
90	115	102,5	5881	0,077	0,3977	5407
115	140	127,5	2016	1,37	0,1561	2122
140	165	152,5	137	2,65	0,0119	162

$t = \frac{|X_i - \bar{X}|}{S}$  - промежуточный коэффициент;  $Z_i = f(t)$  - характеристика нормально-

го закона распределения;  $f' = \frac{nc}{S} Z_i$  - теоретическая частота при нормальном законе распределения;  $C$  - шаг интервала, равный 25 кнм.

Из рассмотрения соответствующих значений  $f_i$  и  $f'_i$  следует, что эмпирическое распределение и теоретическое нормальное хорошо согласуются. Покажем это визуально.

Построим по гистограмме полигон распределения крутящего момента и наложим на него теоретический нормальный закон распределения. Для этого определим координаты характерных точек кривой нормального распределения (табл. 2).

Таблица 2

Абсцисса	$X = \bar{X}$	$X = \bar{X} \pm S$	$X = \bar{X} \pm 2S$	$X = \bar{X} \pm 3S$
Ордината	$f_{\bar{X}} = 0,4 \frac{nc}{S}$	$f_S = 0,242 \frac{nc}{S}$	$f_{2S} = 0,054 \frac{nc}{S}$	$f_{3S} = 0$

Результаты расчета показывают:

$$f_{\bar{X}} = 5438 \text{ кнм}; \quad f_S = 3290 \text{ кнм}; \quad f_{2S} = 734 \text{ кнм}; \quad f_{3S} = 0.$$

Сравнение эмпирического и теоретического нормального законов распределения представлено на рис. 2.

Сравнивая полученные кривые, убеждаемся в высокой степени их согласования, а это позволяет сделать вывод о том, что характер нагружения силового редуکتора клетки № 5 подчиняется нормальному закону распределения. Следовательно, при оценке среднего значения крутящего момента, определяемого по диаграмме за рассматриваемый промежуток времени, его можно определять, как средневзвешенное значение между максимальной и минимальной величиной крутящего момента.

Наличие временных характеристик на гистограмме (рис. 1) позволяет интер-

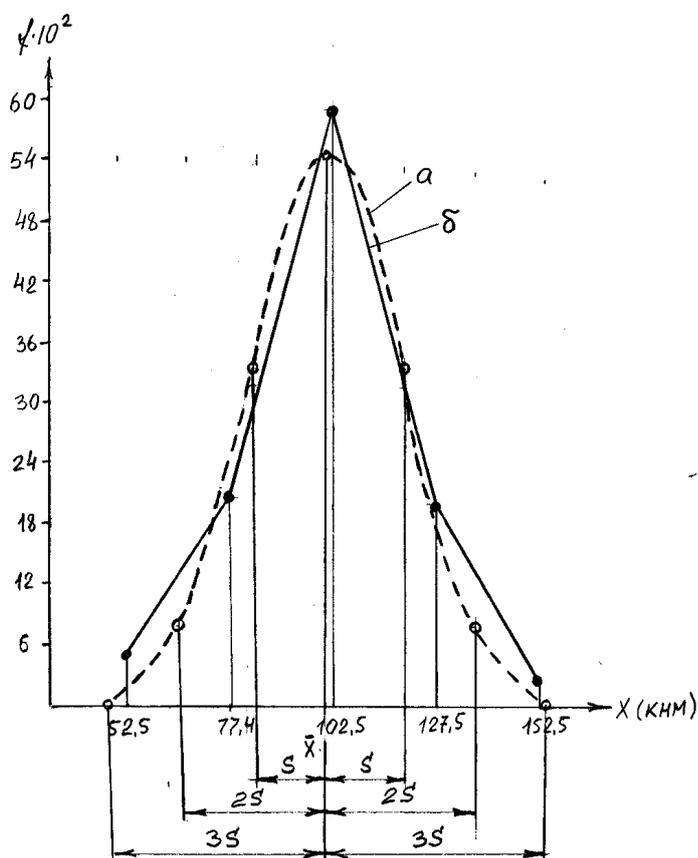


Рис. 2. Кривые нормального распределения: а) теоретическая; б) эмпирическая.

претировать их как вероятностную зависимость длительности действия различных нагрузок приложенных к редуктору при определении его надежности, ресурса, срока службы и так далее.

Таким образом, анализ диаграмм крутящего момента на ведущем валу силового редуктора чистовой клетки № 5 НТЛС «1680» показал, что при рассмотрении рабочих характеристик зубчатого зацепления можно принять, что режим его нагружения подчиняется нормальному закону распределения и соответствует полученным гистограммам и это позволяет устанавливать длительность действия различных нагрузок приложенных к редуктору.

УДК 621.833.1

## ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА РАБОТЫ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ПРОКАТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Гапонов В.С., докт. техн. наук, Столбовой А.С., канд. техн. наук,

Музыкин Ю.Д., канд. техн. наук, Татьков В.В., канд. техн. наук,

Вышинецкий С.М., Телюк Д.В. (г. Харьков, г. Запорожье, Украина)

*The questions of an estimate of accumulated damages and residual resource of gears of rolling inventory are considered.*

Принцип линейного суммирования повреждений, накопленных за период работы с конкретными условиями нагружений [1], позволяет при непрерывной фиксации этих условий работы с начала эксплуатации или после ремонта с установкой новых деталей оценивать наработку и остаточный ресурс до планово-профилактических и ремонтных работ.

Для оценки остаточного ресурса работы на первом этапе необходимо установить основные причины выхода из строя конкретной зубчатой передачи.

Опыт эксплуатации редукторов прокатных станков с шевронными зубчатыми колесами показывает, что в большинстве случаев минимальную надежность имеют зубья ведущей вал-шестерни, испытывающей регулярные перегрузки вследствие упругой закрутки вала, упругих деформаций зубьев правого и левого полушевронных, ошибок изготовления и затрудненной возможности самоустановки шевронной передачи из-за большой массы и инерционности вал-шестерни. Ресурс работы зубчатых

передач прокатных станов чаще всего определяется усталостной прочностью зубьев по напряжениям изгиба. При больших передаточных числах зубья ведущей валшестерни должны выдерживать значительно большее число циклов нагружений, что достигается применением высоколегированных сталей с цементацией и закалкой рабочих поверхностей. Этот факт, в свою очередь, приводит к возрастанию степенной зависимости предельного ресурса работы от нагрузки и пределов выносливости.

Основой для приближенной оценки изменения ресурса работы является ежесуточное осциллографирование конкретных режимов эксплуатации.

Методика определения долговечности зубчатых передач базируется на эмпирическом условии суммирования повреждений [1]

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = a - const,$$

где  $n_i$  - общее число циклов действия некоторого напряжения  $\sigma_i$ , пропорционального при изгибе вращающему моменту  $T_i$ ,  $N_i$  - число циклов до разрушения при том же напряжении,  $a$  - экспериментально установленный параметр, обычно близкий к единице.

Исходя из уравнений кривой усталости [1], действие в течение  $t_i$  часов всего комплекса напряжений, определяемых изменяющимся вращающим моментом  $T_i$ , можно заменить напряжением от расчетного момента, действующего в течение эквивалентного числа циклов. Принцип суммирования повреждений от напряжений изгиба, накопленных за сутки работы с постоянной частотой вращения  $n_j$  и изменяющимся моментом  $T_i$ , действующим в течение  $t_i$  часов, позволяет представить усталостные явления в виде

$$\Delta_j = 60 \cdot n_j \sum t_i T_i^m = 60 \cdot n_j t_c \cdot \mu_j T_{j\max}^m,$$

где  $T_{j\max}$  - наибольшее длительно действующее значение вращающего момента,  $m$  - показатель степени кривой усталости при расчете на выносливость при изгибе,  $\mu_j$  - коэффициент, характеризующий интенсивность нагружения в течение рассматриваемых суток,  $t_c = \sum t_i = 24$  час – время работы в течение  $j$ -х суток.

По ГОСТ 21354-87 [1] в качестве исходной расчетной нагрузки  $T_{j\max}$  рекомендуется принимать наибольшую длительно действующую с общим числом циклов перемены напряжений более  $5 \cdot 10^4$  за весь ресурс работы. Показатель степени кривой усталости для азотированных, цементированных и нитроцементированных зубчатых колес с не шлифованной переходной поверхностью принимают  $m = 9$ , а в остальных случаях при расчетах на изгиб  $m = 6$ .

Коэффициент, характеризующий интенсивность нагружения при изгибе с постоянной частотой вращения,

$$\mu_j = \sum \left( \frac{T_i}{T_{j\max}} \right)^m \cdot \frac{t_i}{t_c}.$$

При работе в типовом тяжелом режиме нагружения [1], когда отношение среднего и максимального длительно действующих моментов составляет  $\nu_{cp} = T_{jcp} / T_{j\max} = 0,77$ , а показатель степени кривой усталости  $m = 9$ , коэффициент

$\mu_j$  принимается равным 0,2. При типовом среднем равновероятном режиме с параметром  $\nu_{cp} = 0,5$  имеем  $\mu_j = 0,1$ . Для зубчатых колес с однородной структурой материала и зубчатых колес со шлифованной переходной поверхностью независимо от твердости и термообработки зубьев с показателем степени кривой усталости  $m = 6$  при типовом тяжелом режиме нагружения коэффициент  $\mu_j$ , характеризующий интенсивность нагружения, принимается равным 0,3, а при среднем равновероятном режиме этот коэффициент составит  $\mu_j = 0,143$  [1].

Практика эксплуатации прокатного оборудования показывает, что фактический режим нагружения в большинстве случаев находится в области типового тяжелого режима.

При проектировании, изготовлении и поставках нового оборудования оговаривают ожидаемый ресурс работы  $t_\Sigma$  при номинальном режиме эксплуатации с вращающим моментом  $T_{ном}$ , частотой вращения  $n_{ном}$  и ожидаемым типовым режимом нагружения, характеризуемым коэффициентом  $\mu_{ном}$ . Исходя из метода оценки эквивалентного числа циклов при переменных напряжениях изгиба [1], накопленные за сутки работы повреждения можно оценить в виде

$$\Delta_j = 60 \cdot n_{ном} \cdot t_j \cdot \mu_{ном} T_{ном}^m,$$

где  $t_j$  - отработанный часовой ресурс за  $j$ -е сутки эксплуатации.

Из приведенных зависимостей следует

$$t_j = 24 \cdot \frac{n_j}{n_{iii}} \cdot \frac{\mu_j}{\mu_{iii}} \cdot \left( \frac{T_{jmax}}{T_{iii}} \right)^m.$$

При незначительных отклонениях фактических частот вращения  $n_j$  от номинальных паспортных данных и повторяющемся плановом режиме нагружения  $\mu_j \approx \mu_{iii}$  суточную усталостную наработку можно оценить приближенно по среднему вращающему моменту

$$t_j \approx 24 \cdot \left( \frac{T_{jep}}{\nu_{cp} \cdot T_{iii}} \right)^m.$$

Накопленную наработку целесообразно фиксировать в журнале эксплуатации, подводя еженедельные и ежемесячные итоги. Остаточный ресурс работы  $t_0$  определяется принятым базовым ресурсом  $t_\Sigma$  при номинальных условиях эксплуатации

$$t_0 = t_\Sigma - \sum_{j=1}^{j=k} t_j,$$

где  $k$  - число суток эксплуатации.

Приближенный учет эксплуатационного режима и временная оценка накопленных повреждений позволяет планировать ремонтные работы и заказывать запасные детали с учетом фактических нагрузок, действующих при реализации конкретного технологического процесса.

**Литература:** 1. ГОСТ 21354-87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность. Введ. 27.10.87. -М.: Изд-во стандартов, 1988. - 127 с.

## КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗУБОЗАЦЕПЛЕНИЯ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

**Ушаков М.Н., Воробьев Ю.С.** докт. техн. наук (г. Харьков, Украина)

*The control of a technical condition and improvement of quality of production, reduction of noise and vibration are tasks decision of which is closely connected to deep studying of vibroacoustic processes occurring in mechanisms and units.*

Для выявления взаимосвязи между дефектом машины и вибросигналом необходимо построение диагностической модели, которая может быть представлена в виде системы алгебраических или дифференциальных уравнений, имитационной модели, логического соотношения.

Диагностическая модель дефектов зубчатой передачи мельницы построена на основании применения уравнения Лагранжа второго рода. Согласно расчетной схеме (рис. 1) имеем систему с четырьмя степенями свободы: угол поворота колеса  $\varphi_1$ , шестерни  $\varphi_2$ , поперечные смещения колеса  $x_1$ , шестерни  $x_2$ . Деформация в зубчатом зацеплении  $x_3$  является функцией обобщенных координат:

$$x_3 = -x_1 + \varphi_1 R_1 + x_2 - \varphi_2 R_2, \quad (1)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  - радиус колеса и шестерни по делительной окружности, м.

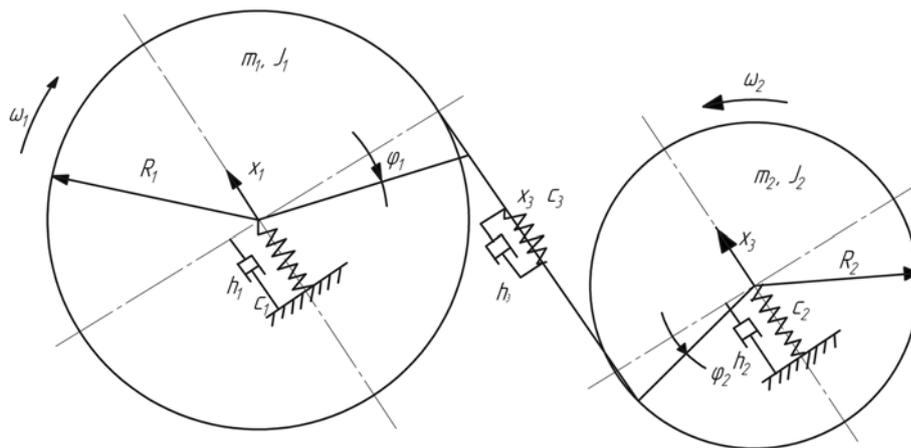


Рис. 1. Динамическая схема зубчатой передачи при расчете на связанные крутильно-поперечные колебания.

Кинетическая энергия системы определяется из выражения:

$$T = \frac{1}{2} ( J_1 \dot{\varphi}_1^2 + J_2 \dot{\varphi}_2^2 + m_1 \dot{x}_1^2 + m_2 \dot{x}_2^2 ), \quad (2)$$

где  $J_1, J_2$  - моменты инерции зубчатого колеса и шестерни,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $m_1, m_2$  - масса колеса и шестерни, кг.

Потенциальная энергия системы:

$$T = \frac{1}{2} ( c_1 x_1^2 + c_2 x_2^2 + c_{k1} \varphi_1^2 + c_{k2} \varphi_2^2 ), \quad (3)$$

где  $c_1, c_2$  и  $c_{k1}, c_{k2}$  - поперечная жесткость опор и жесткость цапф на кручение.

Обобщенные возмущающие силы по соответствующим обобщенным координатам являются функциями от циклической кинематической погрешности:

$$\begin{aligned}
Q_{1F}(t) &= c_3 \Delta \sin(\omega_D t + \psi) \\
Q_{2F}(t) &= -c_3 \Delta \sin(\omega_D t + \psi) \\
Q_{1\varphi F}(t) &= -c_3 \Delta \sin(\omega_D t + \psi) R_1 \\
Q_{2\varphi F}(t) &= c_3 \Delta \sin(\omega_D t + \psi) R_2
\end{aligned} \tag{4}$$

где  $\omega_D$  - частота циклической погрешности,  $c^{-1}$ ;  $\Delta$  - амплитуда погрешности, мм.

Силы, соответствующие силам сопротивления:

$$Q_{iR} = \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i}, \tag{5}$$

где  $\dot{q}_i$  - обобщенная скорость,  $D$  - функция рассеивания (диссипативная функция Релея), являющаяся однородной квадратичной формой обобщенных скоростей:

$$D = \frac{1}{2} (h_1 \dot{x}_1^2 + h_2 \dot{x}_2^2 + h_3 \dot{x}_3^2 + h_{k1} \dot{\varphi}_1^2 + h_{k2} \dot{\varphi}_2^2), \tag{6}$$

где  $h_1, h_2$  и  $h_3$  - коэффициенты сопротивления в опорах и зацеплении;  $h_{k1}, h_{k2}$  - коэффициенты сопротивления цапф на кручение;  $\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2$  - обобщенные скорости;

$$\dot{x}_3 = -\dot{x}_1 + R_1 \dot{\varphi}_1 + x_2 - R_2 \dot{\varphi}_2. \tag{7}$$

На основе полученных выражений (2 - 6), проведя соответствующие преобразования, составим уравнения Лагранжа второго рода в виде:

$$\begin{aligned}
m_1 \ddot{x}_1 + h_1 \dot{x}_1 - h_3 \dot{x}_3 + c_1 x_1 - c_3 x_3 &= c_3 \Delta \sin(\omega_D t + \psi) \\
m_2 \ddot{x}_2 + h_2 \dot{x}_2 + h_3 \dot{x}_3 + c_2 x_2 + c_3 x_3 &= -c_3 \Delta \sin(\omega_D t + \psi) \\
J_1 \ddot{\varphi}_1 + h_{k1} \dot{\varphi}_1 + h_3 R_1 \dot{x}_3 + c_{k1} \varphi_1 + c_3 R_1 x_3 &= -c_3 \Delta \sin(\omega_D t + \psi) R_1 \\
J_2 \ddot{\varphi}_2 + h_{k2} \dot{\varphi}_2 - h_3 R_2 \dot{x}_3 + c_{k2} \varphi_2 - c_3 R_2 x_3 &= c_3 \Delta \sin(\omega_D t + \psi) R_2
\end{aligned} \tag{8}$$

В результате решения системы уравнений (8) численным методом Эйлера получен закон движения зубчатых колёс зубчатой передачи в зависимости от величины износа зубьев (погрешность шага зацепления) -  $\Delta$ . Качественный анализ математической модели позволил выявить диагностические признаки износа колёс: увеличение амплитуды вибраций на частоте 87,5 Гц.

Исследования статистических характеристик временного процесса вибрации подшипниковых узлов шестерни показали равенство дисперсии и математических ожиданий последовательных оценок по множеству и по времени, график функции автокорреляции при увеличении аргумента  $\tau = t_2 - t_1$  стремиться к нулю, что говорит о стационарности и эргодичности вибрации шестерни.

**Литература:** 1. Балицкий Ф.Я., Иванова М. А., Соколова А. Г., Хомяков Е. И. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов. –М.: Наука, 1984. – 119 с. 2. Авакян В. А. Разработка теоретических положений, внедрение в промышленность методов и средств вибродиагностики роторных машин и станков. – Дис. ... докт. техн. наук. – Ереван, 1984. 3. Биргер И. А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с. 4. Барков А. В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. –СПб., 2000. – 158 с.

## ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ КОТЕЛЬНОЙ ТОПКОЙ С НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМ КИПЯЩИМ СЛОЕМ

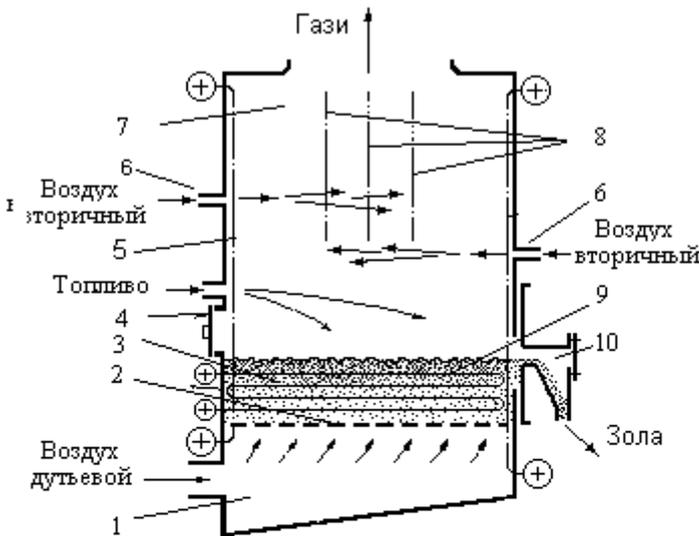
Воинов А. П., докт. техн. наук, Воинова С. А., канд. техн. наук  
(г. Одесса, Украина)

*The features of control of the two-stage boiler fire-box with the low-temperature boiling bed are adduced.*

Известные традиционные технологические схемы котельных топок (ОТ) с низкотемпературным кипящим слоем (КС) рассчитаны на обнеступенчатое сжигание

топлива. Поэтому весь дутьевой воздух подается под воздухораспределительную решетку (ВРР). В этом случае основная часть тепловыделения осуществляется в объеме самого КС ( $V_{\text{КС}}$ ); в объеме надслойного пространства топки – камере ( $V_{\text{К}}$ ) – идет дожигание продуктов неполного сгорания ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m$ ), выдаваемых в небольшом количестве слоем.

В предлагаемой технологической схеме двухступенчатой топки (ДТ) с низкотемпературным КС (рис. 1) под ВРР (2) подается первичный (дутьевой) воздух (объемом  $V_1$ ). В надслойное пространство топки (в камеру (7)) через сопла (6) подается высокоскоростными струями вторичный воздух (объемом  $V_2$ ). В подобной топке, в первой ступени (в объеме



1 - дутьевая камера, 2 - воздухораспределительная решетка, 3 - кипящий слой, 4 - дверца, 5 - топочный радиационный экран, 6 - сопла вторичного воздуха, 7 - топочная камера, 8 - пучок труб всестороннего обогрева, 9 - поверхность нагрева, погруженная в кипящий слой, 10 - узел слива золы

Рис.1. Схема топки с двухступенчатым кипящим слоем.

КС –  $V_{\text{КС}}$ ) процесс горения сдвинут в сторону газогенераторного, то есть он идет при коэффициенте избытка воздуха ( $\square_1$ ), меньшим единицы. Газы, в значительном количестве выходящие из слоя, содержат в своем составе продукты неполного сгорания. В надслойном пространстве эти продукты в смеси со вторичным воздухом сгорают.

Т. о., в ДТ с КС тепловыделение осуществляется в первой ступени (в КС) и во второй ступени (в камере). Поэтому в слое объемная плотность тепловыделения ( $Q_{\text{КС}}/V_{\text{КС}}$ ) и уровень температуры слоя ( $\square_{\text{КС}}$ ) ниже по сравнению с таковыми в ОТ с КС. А в камере - картина обратная: ( $Q_{\text{К}}/V_{\text{К}}$ ) и температура ( $Q_{\text{К}}$ ) выше, чем в камере ОТ с КС. При этом, чем больше доля тепловыделения во второй ступени (по отношению к тепловыделению топки в целом), тем  $\square_{\text{К}}$  выше.

В ДТ с КС режим работы слоя остается низкотемпературным. Режим же камеры смещается в сторону высокотемпературного, которому свойственен повышенный выход оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ).

Для устранения данного недостатка ДТ с КС, необходимо в них применить тех-

нологию объемно-охлаждаемых топок. (ООТ) [1] В комбинированной топке, включающей ДТ с КС и ООТ, выход  $\text{NO}_x$  можно сохранить на низком уровне.

Предложенная котельно-топочная технология «ДТ с КС + ООТ» позволяет использовать соотношение  $V_1/V_2$  (при любом значении коэффициента избытка воздуха топки ( $\square_T$ )) в качестве инструмента управления соотношением  $(Q_{\text{КС}}/V_{\text{КС}}) / (Q_{\text{К}}/V_{\text{К}})$ , следовательно, управления температурой топочной среды в каждой из ступеней: ( $\square_{\text{КС}}$ ) и ( $\square_{\text{К}}$ ).

Теоретический анализ технологических свойств традиционных ОТ с КС и ДТ с КС убеждает в том, что последние обладают рядом преимуществ перед первыми. А замеченные недостатки ДТ с КС относительно невелики.

Существенный интерес представляют особенности управления технологическим процессом топок с КС [2, 3], особенно ДТ с КС. Отметим некоторые из них.

Система автоматического управления (САУ) котлом, оснащенным ДТ с КС, содержит традиционные регуляторы тепловой нагрузки (топлива) (1), экономичности (воздуха) (2) и тяги (газов) (4) (рис. 2). Первый по сигналу «давление пара» (Р) управляет количеством подаваемого топлива (В). Второй по сигналу «расход пара» (D) и сигналу «скорость изменения Р» (получаемому от дифференциатора (Диф)), которые отражают соотношение «теплота – воздух», управляет подачей общего воздуха ( $V = V_1 + V_2$ ). Оба регулятора получают также сигналы обратной связи, первый по положению регулирующего органа (РО) топлива, второй – по «V». Третий (регулятор 3) по сигналу «разрежение в топке» ( $H_T$ ) управляет количеством отводимых из котла газов ( $V_T$ ).

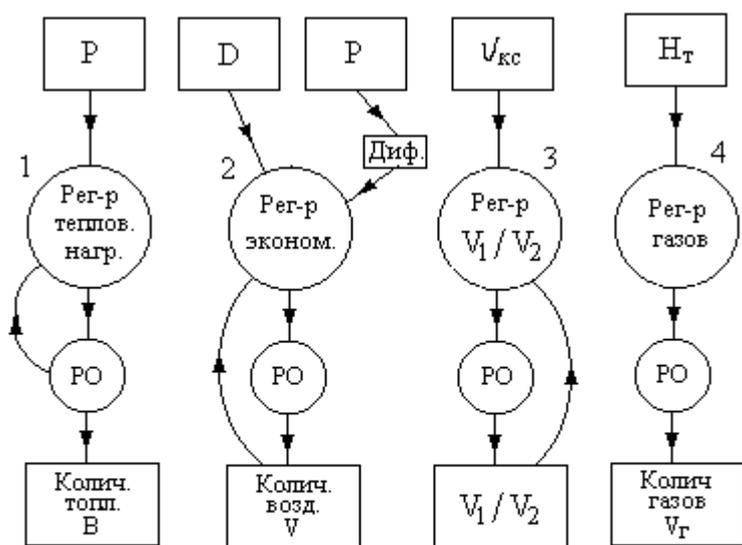


Рис.2. Структурно-логическая схема САУ котлом с двухступенчатой топкой с низкотемпературным кипящим слоем.

апазоне.

Вариант поддержания соотношения  $V_1/V_2 = f(D)$  выглядит предпочтительным, т. к.  
 - упрощает алгоритм управления, потому что при допущении некоей статической ошибки регулирования позволяет повысить устойчивость процесса управления,  
 - позволяет с увеличением  $D$  несколько повышать  $\square_{\text{КС}}$ , чем дополнительно интенсифицировать теплообмен и в объеме КС, и в камере.

В случае ДТ с КС новым является регулятор соотношения ( $V_1/V_2$ ) – регулятор (3). Он работает по сигналу « $\square_{\text{КС}}$ » и сигналу обратной связи по « $V_1/V_2$ ». Поскольку соотношение  $V_1/V_2$  определяет соотношение тепловыделения между ступенями горения –  $Q_{\text{КС}}/Q_{\text{К}}$ , – оно влияет на температуру КС.

В связи с этим, представляется целесообразным регулятору соотношения  $V_1/V_2$  поручить поддержание  $\square_{\text{КС}}$  на заданном уровне или в заданном интервале ее значений при изменении  $D$  в регулируемом диапазоне.

В качестве опережающего сигнала, при изменении D котла, на регулятор 3 можно подать опережающий (исчезающий в статике) сигнал динамической связи (ДС) от регулятора 2.

Следует отметить то, что существенным внешним источником возмущений технологического процесса топок с КС является гранулометрический состав сжигаемого твердого топлива. В целях повышения устойчивости и качества управления технологическим процессом, целесообразно использовать твердое топливо стабильного гранулометрического состава, особенно по содержанию размерной фракции 0 – 1 мм.

#### Выводы

1. Предлагаемая технологическая схема ДТ с КС обладает свойствами, делающими ее перспективной.
2. Технологический процесс ДС с КС нуждается в управлении соотношением между потоками первичного и вторичного воздуха.
3. Предложен регулятор соотношения потоков первичного и вторичного воздуха, действующий по сигналу - “температура КС”.
4. Технологический процесс ДТ с КС, а также САУ им, подлежат теоретическому, экспериментальному исследованию и внедрению в котельные установки, работающие на низкокачественном твердом топливе.

**Литература:** 1. Воинов А. П. Особенности рабочего процесса котлов с объемно-охлаждаемой топкой. // Изв. Вузov СССР - Энергетика. - 1982.- № 1. С. 62 - 67. 2. Воїнова С. О. Питання управління тепловим навантаженням котлів з низькотемпературним киплячим шаром. Зб.. наук. праць ОДАХТ «Удосконалення існуючих та розробка нових технологій для харчової та зернопереробної промисловості» // Мін. освіти України. - Одеса: 2001 - Вип. 22: - С. 185. 3. Воїнова С. А. Управление надежностью котельно-топочных систем, работающих на твердом низкокачественном топливе // Вісник Інженерної академії України. - 2001. - № 3. - С. 178 –181.

## УДК 621.502.33

### ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ЕКОЛОГІЧНОЇ Й ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Воїнова С. О., канд. техн. наук (м. Одеса, Україна)

*The seatures of interrelation of ecological end economic efficienci of technical objects are adduced.*

Екологічна ефективність (ЕлЕ) і економічна ефективність (ЕнЕ) технічного об'єкта (ТО) є важливими складовими його технологічній ефективності й ефективності в цілому (Рис. 1).

Традиційно склалося представлення про ЕнЕ як про найважливішу характеристику технічного рішення, ТО, технологічного процесу і т. д. Цей показник дотепер використовують як фактор оцінки ступеня технічної і навіть науково-технічної досконалості ТО. Однак, те, що прискорюється погіршення стану живої природи у світі, змусило переглянути цю точку зору, змусило вважати єдино вірною діагностичною ознакою ступеня загальної досконалості ТО, і соціального, і технологічного, – ступінь його ЕлЕ.

Зазначена точка зору з'явилася основою концепції порятунку природного середовища від негативного антропогенного впливу на неї, який неухильно підсилюється.



Рисунок. Структурно-логічна схема поняття „ефективність”.

Особливу актуальність придбала проблема порятунку природного середовища від впливу енергетики, насамперед стаціонарної її частини. Як приклад використовуємо дані цієї галузі.

Показники функціонування, особливо зношених енергетичних установок, а в них котельних установок (КУ), значно нижче рівня сучасних вимог. Це насамперед відноситься до ступеня їх ЕлЕ. Вона неприпустимо низка.

Дана обставина має особливе значення з обліком того, що енергетика в цілому є основним забруднювачем природного середовища. На її частку приходиться, як відомо,

- шкідливих викидів ~ 48 %,
- шкідливих скидань ~ 27 %,
- твердих відходів > 70 %,
- викиду парникових газів до 70 %.

Настільки ж несприятлива картина теплового забруднення атмосфери.

У загальному обсязі шкідливого впливу КУ на природне середовище, при, приблизно, однаковій кількості палива, що спалюється агрегатами електростанцій і агрегатами промислових котелень, на частку останніх приходиться значно більша частина відповідальності за принесену шкоду, тому що вони технічно менш досконалі.

Слід зазначити те, що так називана моторна енергетика також наносить живій природі значної втрати. Становить інтерес аналіз взаємного впливу, взаємозв'язку двох найбільш істотних показників ступеня досконалості ТО – ЕлЕ і ЕнЕ. Подібний аналіз зручно провести стосовно до енергетики.

Прогрес устаткування цієї галузі виявляється насамперед у зниженні питомої витрати палива на вироблення одиниці продукції (однієї тонни пари, однієї кВт-години й ін). Унаслідок цього відповідно знижується рівень питомого шкідливого впливу на навколишнє середовище КУ, що споживають паливо. Таким чином, підвищення ЕнЕ процесу використання палива в енергетиці сприяє, обумовлює підвищення ЕлЕ енергоустановок.

Тобто, у даному випадку підвищення ЕлЕ є наслідком збільшення ЕнЕ устаткування, тому є вторинним, непрямим, побічним корисним результатом вкладення ресурсів у підвищення ЕнЕ. Даний шлях поліпшення ЕлЕ варто визнати продуктивним, доцільним, формально безвитратним. Однак, можливості цього шляху обмежені, а доступні результати часто не задовольняють діючим високим вимогам до рівня ЕлЕ устаткування.

Описаний на прикладі КУ позитивний вплив підвищення ЕнЕ на рівень ЕлЕ ТО – дуже важлива обставина. Його, однак, не завжди беруть до уваги при прогнозуванні можливого позитивного ефекту, зумовлюваного заходами, спрямованими на підвищення ЕнЕ, і часто не враховують при оцінці отриманого результату.

Для досягнення належного рівня ЕлЕ устаткування, приходиться здійснювати ряд заходів, що дозволяють скоротити шкідливий вплив на природне середовище, наприклад, шляхом, насамперед, скорочення кількості шкідливих речовин, які утворюються в КУ. Цей прийом – ослаблення процесу утворення шкідливих речовин – є ак-

тивним шляхом впливу на викид чи скидання зазначених продуктів. Але цього прийому звичайно буває недостатньо. Приходиться застосовувати ще один прийом, а саме, – за котлами встановлювати газоочисні засоби. Це – пасивний шлях, тому що, фактично, являє собою виправлення раніше допущеного утворення шкідливих речовин у котлах.

На описані активні і пасивні засоби підвищення ЕлЕ КУ підприємства витрачають цільові ресурси. У цьому випадку одержуваний позитивний екологічний ефект є вже не побічним, а цільовим. Зазначені вкладення ресурсів значні, іноді виявляються порівнянними з витратами на основне устаткування і його технічне (експлуатаційне і ремонтне) обслуговування.

Вкладення цільових ресурсів у заходи щодо підвищення ЕлЕ ТО збільшує собівартість продукції підприємства. Якщо ж аналізувати тільки функціонування КУ, що працюють у котельні цього підприємства, то варто констатувати викликане зазначеними заходами підвищення собівартості продукції котельні, тобто, формальне зниження її ЕнЕ

Необхідно особливо відзначити принципово важливе положення: вкладення коштів у підвищення ЕлЕ устаткування завжди доцільно, незалежно від супровідних обставин. А вимірити екологічний ефект заходу одиницями ЕнЕ неможливо, і необхідності в цьому немає, тому що будь-який екологічно корисний захід є абсолютно виправданий.

З викладеного випливає, що розподіл ресурсів підприємства (чи галузі) між комплексом заходів екологічного характеру і комплексом заходів економічного характеру являє собою дуже відповідальну, складну науково-технічну й організаційно-технічну задачу.

При роботі над нею необхідно враховувати вплив численних факторів різноманітного характеру і різного ступеня важливості. Необхідно враховувати те, що, наприклад: в одному випадку доцільно кошти направити тільки на досягнення непрямого екологічного ефекту; в другому – направити також на одержання активного ефекту (у КУ); у третьому – кошти направити тільки на одержання радикального пасивного ефекту, шляхом застосування високо ефективної газоочисної технології і техніки і т. д.

До участі в рішенні розглянутих задач, необхідне залучення фахівців різного профілю, у тому числі екологів, що добре знають технологічний процес у кожному конкретному випадку. При цьому важливо враховувати особливості взаємного впливу технологічних, тобто, екологічних, економічних і загальнотехнічних властивостей, характеристик ТО. Є підстава думати, що приведені особливості взаємозв'язку ЕлЕ і ЕнЕ характерні для ТО всіх галузей виробництва.

#### Висновки

1 Закономірності взаємного впливу екологічних і економічних властивостей ТО зовні неочевидні і складні.

2 Вибір кращого рішення при розподілі можливостей впливу на ці властивості ТО – складна і відповідальна науково-технічна задача.

3 До участі в її рішенні необхідно залучати фахівців-технологів, а також екологів.

4 Підвищення рівня ЕлЕ ТО залишається найважливішою серед задач, рішення яких спрямовано на прогрес будь-якої галузі виробництва.

**Література:** 1. Воїнова С. О. Відображення ефективності технічних рішень у навчально-виховному процесі. \ Матер.36-ої н.-метод. конф. викладачів “Шляхи розвитку методичного забезпечення навчального процесу в умовах реформ вищої освіти”. – 6 квітня 2005 року. Ч. 1. – Мін. освіти і науки України. – Одеса.: ОНАХТ. 2005. С. 56.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗКИ СЛИТКОВ SI НА ПЛАСТИНЫ ЗА СЧЁТ АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ С ПОМОЩЬЮ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ

Ерошин С. С., докт. техн. наук, Третьяк А.Е. канд. техн. наук  
(г. Луганск, Украина)

*Based on the technological factors analysis of single crystal ingots slicing with AKVR the following has been accomplished: found dominating factors; developed methods of improving slicing efficiency, which based on process monitoring; appropriate hardware and software to provide this monitoring are proposed. Increasing the efficiency of cutting Si ingots to plates due to active monitoring using microprocessor systems.*

Операция резки слитков на пластины, являясь начальной стадией технологического процесса производства полупроводниковых приборов (ПП) и интегральных схем (ИС), оказывает большое влияние на экономичность всего процесса в целом. Условия проведения этой операции определяют качество полупроводниковых подложек, которое непосредственно влияет на характеристики будущих приборов.

На протяжении всего этапа развития микроэлектроники наблюдаются устойчивые тенденции технологии подготовки подложек ИС и ПП: непрерывное увеличение диаметра подложек; повышение требований к геометрической точности и качеству поверхности; расширение гаммы используемых материалов; повышение степени автоматизации технологического оборудования и переход к автоматизированным производствам.

Эти тенденции и новые требования привели к изменению способов резки слитков. Если в течение последних сорока лет технология резки монокристаллов на пластины алмазными отрезными кругами с внутренней режущей кромкой (АКВР) успешно используется для удовлетворения самого широкого круга потребителей, то в настоящее время наблюдается возврат к проволочной резке. Последняя за счет групповой технологии обеспечивает существенное повышение производительности и, в некоторой степени, облегчает решение проблемы резки слитков большого диаметра. Однако, несмотря на явные преимущества проволочной резки, алмазные отрезные круги с внутренней режущей кромкой продолжают применяться в промышленности, так как при правильной организации технологического процесса они обеспечивают более высокую точность. Резка кругами АКВР более универсальна и легче адаптируется в условиях расширения гаммы обрабатываемых материалов и их номенклатуры. Подтверждением сказанному может служить и тот факт, что ведущие мировые производители продолжают разрабатывать станки для резки монокристаллов кругами АКВР. Так, например, японская фирма TOYO выпустила на рынок станок модели T-SM-300 CNC, предназначенный для резки слитков кремния диаметром 300 мм.

Объективно и то, что в настоящее время промышленность обладает огромным парком станков типа «Алмаз 6М» и «Алмаз 12М», которые, находясь не в лучшем физическом состоянии, перерабатывают до 90% всего кремния и сапфира. Так как заменить эти станки в кратчайший период не представляется возможным, то возникает задача их реанимации и оптимизации технологического процесса с целью повышения его эффективности.

На основании экспериментальных исследований, проведенных в производственных условиях в разное время на нескольких предприятиях электронной промышлен-

ности, было установлено, что рассматриваемый процесс является сложной системой, зависящей от большого числа контролируемых и неконтролируемых факторов.

Точность отрезаемых пластин и стойкость инструмента достаточно полно характеризуют процесс и могут быть параметрами оптимизации.

Статистический материал был обработан с применением методов корреляционного и регрессионного анализа, в результате чего получены математические модели. Анализ математических моделей и наблюдений за процессом в цехах позволили установить следующее:

- доминирующими факторами процесса являются: натяжение инструмента и его режущие свойства (износ), поперечная подача, уровень вибраций, радиальное биение режущей кромки, диаметр разрезаемого слитка;

- точность отрезаемых пластин уменьшается по мере износа инструмента, увеличения диаметра слитка, уровня вибраций и радиального биения режущей кромки. Точность увеличивается, когда натяжение корпуса инструмента возрастает. Пластины кремния, отрезанные по плоскости (111), имеют меньшую величину неплоскостности, чем при резке по плоскости (001);

- увеличение диаметра разрезаемого слитка, радиального биения, уровня вибраций и радиальной подачи, а так же недостаточное натяжение корпуса АКВР способствуют снижению стойкости инструмента. Стойкость отрезных кругов зависит от кристаллографической ориентации слитка относительно плоскости резания.

На основании сделанных наблюдений предложена физическая модель образования прогиба отрезаемых пластин. Согласно этой модели прогиб отрезаемой пластины является следствием поперечной деформации корпуса АКВР под действием осевой составляющей силы резания. В идеальных условиях, т.е. когда корпус инструмента плоский и перпендикулярность оси вращения шпинделя направлению поперечной подачи отсутствует осевой силы нет. Такие условия выполняются с достаточной точностью на нормально функционирующем станке при новом инструменте.

Осевая составляющая силы резания появляется за счет погрешностей кинематики станка и износа алмазной режущей кромки, который пропорционален числу отрезанных пластин. Наблюдения показали, что износ кромки происходит не симметрично, и это является источником осевой составляющей силы резания. Последняя вызывает поперечный изгиб корпуса АКВР, величина которого, при прочих равных условиях, зависит от жесткости инструмента. Таким образом, прогиб отрезаемых пластин есть функция погрешностей станка, сил резания и жесткости инструмента.

Для повышения точности отрезаемых пластин и эффективности процесса резки предлагается мониторинг следующих технологических факторов: натяжения отрезного круга, увода режущей кромки и уровня вибраций. Источниками информации являются перечисленные ниже приборы и устройства.

Прибор для измерения натяжения кругов АКВР, в модификации ПЭМ401-01 предназначен для применения на станках типа "Алмаз 6М". Прибор крепится к кристаллодержателю. Датчик и возбудитель колебаний устанавливаются в диаметрально противоположных точках вблизи режущей кромки. По вертикали размещают индикатор часового типа, предназначенный для измерения радиальных биений режущей кромки при натяжении инструмента.

В модификации ПЭМ401-02 прибор предназначен для применения на станках типа «Алмаз 12М». Станки такой компоновки имеют шпиндель с большим центральным

отверстием, что дает возможность установить прибор с внутренней стороны отрезного круга. Датчик и возбудитель колебаний располагают вдоль горизонтального диаметра. Они могут быть закреплены стационарно.

Наши последние исследования показали возможность применения описанной методики и прибора для оценки равномерности натяжения отрезного круга и определения величины неравномерности. Для измерения увода режущей кромки мы предлагаем два прибора ПЭМ-500-01 и ПЭМ-600-03. Первый прибор предназначен для активного контроля увода режущей кромки АКВР на станках «Алмаз12М». Прибор имеет графический индикатор, на который выводятся кривая прогиба АКВР вдоль пути резания, максимальная величина прогиба и число отрезанных пластин. Кроме этого, имеется светодиодная индикация, предназначенная для контроля предельно допустимой величины увода. Прибор имеет считыватель флэш-памяти с параллельным интерфейсом, что дает возможность переносить необходимые данные на персональный компьютер для дальнейшей статистической обработки.

Прибор ПЭМ-600-03 совмещает в себе возможности обоих приборов, измерение натяжения и контроль увода режущей кромки. Для контроля уровня вибраций авторами предлагается индикатор ПЭМ-700, который непрерывно осуществляет измерения, сигнализируя о превышении предельно допустимого значения амплитуды вибрации. Поскольку основным источником вибраций является дисбаланс шпиндельного узла станка, предлагается устройство балансировки ПЭМ-300, созданное на базе персонального компьютера.

Как уже говорилось, повышение эффективности процесса алмазной резки является комплексной проблемой, положительный результат может быть достигнут только при использовании комплекса предложенных средств и методов. Имеющийся опыт применения этих средств дает основания для рекомендации их широкого применения.

**УДК 621.318**

### **ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ РАБОЧИХ ОРГАНОВ БЕЗ МЕХАНИЧЕСКИХ ОПОР ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ МАШИН С ПРЯМЫМ ПРИВОДОМ**

**Ерошин С.С.**, докт. техн. наук, **Брешев В.Е.** (г. Луганск, Украина)

*The essence of parametrical synthesis of ring working bodies (RWB) without mechanical support by the criterion of their asymptotic stability of rotation is stated. Application of such RWB simplifies the design of machines with a direct drive of working bodies and improves technical and economic characteristics of machines of various purpose. Parametrical synthesis of working bodies without mechanical support for increase of technical level of machines with a direct drive.*

**Актуальность работы.** Рабочие машины специального и общего назначения, их отдельные узлы и механизмы непрерывно совершенствуются. Повышение технического уровня машин осуществляется посредством внедрения новых технических решений, использованием современных технологий и научных разработок. К ним относятся применяемые в настоящее время бесконтактные опоры [1], валы которых приводят во вращение кольцевые рабочие органы (КРО) машин. Применение таких опор позволяют увеличить рабочую частоту вращения и долговечность машин, снизить потери на трение, однако при этом не уменьшается число вращающихся дета-

лей и их масса, на одном уровне остаются энергопотребление, массогабаритные параметры и себестоимость машин.

Сокращение количества вращающихся деталей, повышение надёжности при снижении себестоимости машины, уменьшение её массы и энергопотребления могут быть достигнуты путем бесконтактной передачи крутящего момента и стабилизирующих сил непосредственно на КРО. В этом случае исключаются узлы подшипников и уплотнений, приводной вал, поэтому конструкция машины с прямым приводом становится более простой – с наименьшим числом деталей. КРО без механических опор могут эффективно применяться в машинах различного назначения – станках для резки монокристаллов, центробежных или вихревых насосах, машинах для сепарации смесей или абразивной обработки внутренних поверхностей емкостей и других.

**Содержание теоретических исследований.** Основной задачей при создании таких машин является обеспечение устойчивого вращения КРО без механических опор. Поэтому параметрический синтез КРО осуществляется по критерию асимптотической устойчивости вращения через динамический анализ, выбор параметров распределения внешних сил и геометрических параметров КРО. При этом реакции механических опор и момент сил на приводном валу заменяются силами другой природы – электродинамическими в сочетании с газо- или гидродинамическими и силами технологических сопротивлений. Внешние силы формируют главный момент, приводящий рабочий орган во вращательное движение, а также главный вектор, который создает реакцию КРО на внешнее воздействие и имеет стабилизирующее значение.

Прежде всего, были исследованы внешние силы, создающие движение, определены аналитические выражения для сил и крутящего момента. Исследовалось действие на КРО плоской системы внешних элементарных сил. При этом каждая элементарная сила, действующая на элементарную площадку КРО, имеет тангенциальную и радиальную составляющие, т.е. направлена под некоторым углом к радиальному направлению в плоскости вращения. Наличие двух составляющих имеет принципиальное значение для устойчивого вращения, так как они формируют не только главный момент, но и главный вектор. Последний оказывает стабилизирующее действие, если находится в отрицательной обратной связи со смещением КРО от исходного положения. С точки зрения устойчивости движения рассмотрены два случая: вращение КРО в исходном (центральном) положении, что соответствует невозмущённому движению, и вращение при возникновении некоторого смещения. При смещении возникает тангенциальная составляющая главного вектора, которая направлена перпендикулярно смещению и поэтому всегда оказывает дестабилизирующее действие на устойчивость вращательного движения.

Разработана математическая модель, которая содержит системы дифференциальных уравнений, описывающих движение центра масс КРО. С их помощью исследована устойчивость движения КРО без механических опор. На основании теорем теории устойчивости Ляпунова А.М. получен критерий асимптотической устойчивости вращения КРО без механических опор

$$\frac{D_{\tau} \sqrt{m}}{V \sqrt{D_r}} < 1.$$

Полученный критерий показывает, что устойчивость движения КРО без механических опор увеличивается с ростом вязкого сопротивления среды  $V$  и жесткости

бесконтактной опоры КРО в радиальном направлении  $d_r$ , которая определяется стабилизирующей радиальной силой  $F_r$ . Устойчивость также возрастает при уменьшении жесткости бесконтактной опоры в тангенциальном направлении  $d_t$ , которая определяется дестабилизирующей тангенциальной силой  $F_t$ , и увеличении массы КРО. Таким образом, при бесконтактном действии внешних сил движение может быть неустойчивым или иметь различную степень устойчивости. Поэтому последующие исследования были посвящены повышению устойчивости КРО без механических опор сведением к нулю тангенциальной составляющей главного вектора. Это достигнуто выбором геометрических параметров и параметров распределения внешних сил, при которых тангенциальные силы создают только вращающий момент, а их равнодействующая равна нулю. В этом случае вращение наиболее устойчиво. Разработаны технические решения, обеспечивающие такие условия, в том числе, разработаны способы приложения к КРО внешней технологической нагрузки, которая может быть сосредоточенной или распределённой, симметричной или несимметричной. Установлено, что несимметричная сосредоточенная нагрузка для сохранения устойчивости вращения должна прикладываться только по внутреннему контуру КРО.

**Экспериментальные исследования.** Для проверки основных выводов теоретических исследований и, прежде всего, найденного критерия асимптотической устойчивости вращения, были разработаны и изготовлены экспериментальная установка с измерительным комплексом, действующие макеты станка резки и динамического насоса с КРО без механических опор. Эксперименты показали, что при выполнении установленного критерия и разработанных условий устойчивое вращение КРО гарантируется. На экспериментальной установке кольцевые пластины без механических опор достигали частоты вращения 4500 об/мин и более, совершали полный цикл «разгон-торможение», воспринимали случайно распределённые силы внешнего сопротивления и различные - симметричные или несимметричные технологические нагрузки. КРО сохраняли фиксированное положение в плоскости вращения на установившихся и переходных режимах.

**Рекомендации по применению и выводы.** Существуют машины, в которых применение КРО без механических опор технически возможно и экономически эффективно. Прежде всего, это станки для резки полупроводниковых монокристаллов и динамические насосы, сепараторы, машины для обработки внутренних поверхностей и другие. На действующем макете станка резки монокристаллов проведена резка слитка кремния новым способом - на проход, который позволяет снять ограничения на диаметр обрабатываемых слитков. При этом размеры отрезного круга без механических опор уменьшаются более, чем в 2 раза, а масса вращающихся деталей - примерно в 100 раз (с 30...70 кг до 0,2...0,4 кг). Существенно упрощается конструкция станка, он становится бесшпиндельным, в 1,5...3 раза снижается его энергопотребление, а масса - в 5...10 раз (с 2...5 т. до 200...400 кг), значительно уменьшается его себестоимость [2]. На макете центробежного насоса показано устойчивое вращение рабочего колеса без механических опор и создание им потока рабочей жидкости. Применение такого рабочего колеса позволяет исключить из конструкции насоса приводной вал, узлы подшипников и уплотнений по валу, достичь высокого уровня герметичности насоса. Это приводит к повышению надёжности и долговечности насосов, расширению области их применения из-за высокого уровня безопас-

ности при работе с агрессивными и опасными средами. Простота конструкции насосов с рабочими колёсами без механических опор обеспечивает уменьшение в 1,2...1,5 раза их массы и габаритов, значительное снижение себестоимости и эксплуатационных затрат. Таким образом, синтез КРО без механических опор позволяет создавать машины с прямым приводом на новом техническом уровне. Данные машины могут иметь широкую область применения – от коммунального хозяйства до микроэлектроники и атомной энергетики. Их производство и эксплуатация обеспечивают получение значительного экономического эффекта.

**Литература:** 1. Гаевик Д.Т. Подшипниковые опоры современных машин. - М.: Машиностроение, 1985. – 248с. 2. Ерошин С.С., Брешев В.Е. Повышение эффективности машин применением рабочих органов без механических опор // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. - №5(17). – С.82-85.

**УДК 621.787.4**

## **ОБ УПРОЧНЕНИИ КРУПНЫХ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ**

**Пашкова Г.И.** (г. Харьков, Украина)

*Was shown, that the combination of local thermal hardening to consequent plastic deforming of transitional fillets and surface of nicks on an optimum regime allows to realise advantages of combined hardening of large crankshafts from high-strength cast iron in full volume.*

Удлинение периода безотказной работы и повышение надежности и долговечности мощных транспортных двигателей является одной из актуальных проблем современного машиностроения. Успешное решение этой задачи связано с совершенствованием технологии изготовления коленчатых валов. Коленчатый вал является ответственной деталью дизеля, подвергается высоким циклическим нагрузкам, в связи с чем его эксплуатационная надежность в значительной степени определяется сопротивлением усталости. Для изготовления таких валов широко используется высокопрочный чугуны с шаровидной формой включений графита [1].

Эффективным способом повышения характеристик усталости является упрочнение материала поверхностным пластическим деформированием (ППД), в частности, обкаткой роликами [2,3]. Указанный метод получил широкое распространение в промышленности, однако оценка сопротивления усталости упрочненных деталей часто приводит к необходимости оптимизации режимов упрочнения для обеспечения максимальных значений пределов выносливости.

Для крупных коленчатых валов транспортных дизелей типа 10Д100 и Д80 (масса 1100 и 1683 кг, длина 4,5 м) применение ППД обкаткой роликами имеет свои особенности, обусловленные конструкцией и материалом вала. Применение упрочняющих обработок шеек для повышения их износостойкости часто приводит к появлению в приповерхностных объемах металла растягивающих остаточных напряжений [4]. В результате снижается эксплуатационная надежность валов. Поэтому актуальной задачей является разработка комбинированных методов упрочнения, позволяющих повысить износостойкость шеек валов при сохранении уровня их усталостных характеристик.

В качестве материала для проведения экспериментальных исследований использовали высокопрочный чугуны, модифицированный Mg, следующего химическо-

го состава, масс. %: 3,4...3,9 C; 1,9...2,5 Si; 0,8...1,25 Mn; 0,5...1,0 Ni; 0,2...0,5 Mo; 0,05...0,1 Mg;  $\leq 0,1$  Cr;  $\leq 0,05$  P;  $\leq 0,02$  S. Основа – Fe.

Исследование упрочнения обкаткой роликами стандартных (диаметр рабочей части 9 мм) и полунатурных (диаметр 50 мм) образцов показало эффективность упрочнения высокопрочного чугуна ППД. Испытания на усталость и изучение распределения остаточных напряжений в поверхностном слое образцов позволили определить величины оптимальных усилий обкатки, которые составляют 600...700 Н для стандартных усталостных образцов и 7-8 кН – для полунатурных. При указанных значениях усилий обкатки достигается максимальный уровень сжимающих остаточных напряжений, а сопротивление усталости повышается на 30-70 % по сравнению с неупрочненными образцами.

Процесс упрочнения коленчатых валов отличается от обработки образцов рядом особенностей, обусловленных влиянием конструкции детали и масштабного фактора. Установлена необходимость обкатки переходных галтелей от шейки к щекам вала. Режимы упрочнения галтелей разрабатывали на основе испытаний на усталость отсеков натуральных коленчатых валов [5]. Получено, что упрочнение с суммарным усилием 32 кН на два рабочих ролика, отличающихся между собой по геометрии рабочего профиля и упрочняющих различные участки галтели, приводит к более равномерному упрочнению всей поверхности переходных галтелей, существенному повышению контактных напряжений и росту предела выносливости коленчатых валов в 1,8 раза по сравнению с неупрочненным состоянием.

Результаты испытаний на усталость отсеков коленчатых валов, подвергнутых различным видам упрочняющей термической обработки (нормализация, закалка токами высокой частоты (ТВЧ), лазерная термическая обработка (ЛТО), электроискровое легирование (ЭИЛ) поверхности шеек), свидетельствуют о том, что практически все исследованные способы термического упрочнения приводят к снижению пределов ограниченной выносливости на 15-25% по сравнению со значениями этой характеристики для чугуна, отпущенного после ранней выбивки отливок (исходный вариант). Упрочнение обкаткой роликами переходных галтелей валов обеспечивает увеличение значений предела выносливости в 1,6 – 2,3 раза [6].

Локальные упрочняющие обработки поверхности шеек коленчатых валов вызывают формирование в них неравномерных по длине шейки остаточных напряжений. Наряду с благоприятными для сопротивления усталости напряжениями сжатия на поверхности валов выявлены зоны с растягивающими остаточными напряжениями, величина которых находится в пределах от 15 до 480 МПа. Это определило необходимость последующей после термического упрочнения обработки поверхностным пластическим деформированием цилиндрической части шеек коленчатых валов [7]. Усилие обкатки выбирали из условий равенства контактных напряжений создаваемым при упрочнении галтелей, а также обеспечения необходимой глубины упрочнения в зависимости от значений твердости на поверхности шеек валов. На основании опытных работ было установлено, что усилие обкатки цилиндрических поверхностей коренных и шатунных шеек коленчатых валов находится в пределах  $45 \pm 3$  кН.

Значения пределов выносливости коленчатых валов из высокопрочного чугуна с различными видами упрочняющей термической обработки и обкаткой роликами галтелей и шеек по оптимальному режиму приведены в таблице.

Результаты испытаний на усталость упрочненных коленчатых валов из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом

№ п/п	Способ упрочнения	Предел выносливости, МПа
1	Ранняя выбивка, отпуск при $680\pm 20^\circ\text{C}$	90
2	Отпуск, обкатка галтелей	165
3	Нормализация при $900\pm 20^\circ\text{C}$	80
4	Нормализация, обкатка галтелей	173
5	Закалка ТВЧ на глубину 4 мм	70
6	Закалка ТВЧ, обкатка галтелей	158
7	Закалка ТВЧ, обкатка галтелей и шеек	160
8	ЛТО 70% поверхности шеек на глубину 1,1 мм	73
9	ЛТО, обкатка галтелей	171
10	ЛТО, обкатка галтелей и шеек	175
11	Нормализация, ЭИЛ	91
12	Нормализация, ЭИЛ, обкатка галтелей	167
13	Нормализация, ЭИЛ, обкатка галтелей и шеек	170

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что сочетание локального термического упрочнения с последующим пластическим деформированием поверхности шеек по оптимальному режиму позволяет в полном объеме реализовать преимущества комплексного упрочнения и приводит к существенному повышению предела ограниченной выносливости коленчатых валов. Наилучшее сочетание уровня остаточных напряжений с эксплуатационной надежностью валов достигается путем применения ЛТО или ЭИЛ и последующего пластического деформирования шеек.

Результаты исследований использованы при изготовлении коленчатых валов транспортных дизелей типов Д100 и Д80 мощностью до 2960 кВт. Это позволило исключить случаи разрушения валов в эксплуатации и установить на двигатели более износостойкие сталеалюминиевые подшипники скольжения с антифрикционным слоем из сплава типа АМО 1-20.

**Литература:** 1. Высокопрочный чугун с шаровидным графитом. Теория, технология производства, свойства и применение / Под ред. М.В. Волощенко. – Киев: Наукова думка, 1974. – 203 с. 2. Папшев Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с. 3. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 327 с. 4. Лобанов В. К., Босин Е. Е., Пашкова Г. И. Комбинированное упрочнение – эффективный способ повышения долговечности коленчатых валов мощных транспортных дизелей // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. научно-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. – Вып. 66. – С. 83-88. 5. Пашкова Г. И. О сопротивлении усталости чугуновых коленчатых валов ДВС // Автомобильный транспорт: Сб. научн. тр. – Харьков: ХНАДУ, 2005. – вып. 16. – С. 132-134. 6. Лобанов В. К., Пашкова Г. И. Оптимизация испытаний на усталость коленчатых валов транспортных дизелей. // Механіка та машинобудування. – 2004. – № 1. – С. 32-35. 7. Декларацийний патент 12480 МПК С21D 1/09, В02С 19/6. Процес зміцнення колінчастих валів / А. П. Любченко, В. К. Лобанов, Г. І. Пашкова (Україна). – № u 200506828; Заявл. 11.07.05; Опубл. 15.02.06, Бюл. № 2.

## О ВЛИЯНИИ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ НА СВОЙСТВА СПЛАВА АЛ-25, ЗАКРИСТАЛИЗОВАННОГО ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Чуйкова Е.В. (г. Харьков, Украина)

*The results of experimental research of strengthening liquid-stamped castings made of aluminium alloy by a method of hot isostatic pressing are stated in the article.*

Применение жидкой штамповки в качестве формообразующей операции позволяет получать отливки плотные по всему сечению, а так же значительно повысить комплекс прочностных и пластических характеристик материала, по сравнению с отлитыми в кокиль (см. табл. 1 и 2). Тем не менее, для поршней, испытывающих в процессе эксплуатации высокие упругие деформации, пластичность получаемого материала остается на недостаточном уровне. С целью упрочнения и повышения пластичности, отливки поршней, полученные методом жидкой штамповки из сплава АЛ-25, обрабатывали на газостате усилием 120 МН. Газостатирование, проведенное при 460°C и выдержке 2 ч. показало, что относительное удлинение ( $\delta$ ) повысилось с 0,85% до 1,0%, а предел прочности ( $\sigma_b$ ) – с 250 МПа до 295 МПа. Представляет интерес оптимизация режимов обработки, обеспечивающих получение заготовок необходимого качества (с улучшенным комплексом прочностных и, особенно, пластических свойств) при минимальных энергозатратах.

Для опытных работ изготовлены методом штамповки в жидкой фазе сплава АЛ-25 образцы диаметром 50 мм и высотой 80 мм под стандартные образцы для механических испытаний на растяжение. Штамповку расплава производили в специально спроектированной и изготовленной форме с использованием принципа поршневого прессования. Зазор между пуансоном и матрицей выдерживали 0,2-0,5 мм (по диаметру). В качестве смазочного материала использовали водный раствор коллоидно-графитового препарата В-1, который с помощью пульверизатора наносили перед каждой заливкой. Температура матрицы и пуансона поддерживалась в пределах 150...200°C. Сплав выплавляли в лабораторной печи сопротивления при 720...740°C, после чего рафинировали препаратом Дегазер и производили заливку в матрицу мерными ковшами. Температура заливки составляла 710...720°C, время от начала отбора расплава из печи до окончания заливки в форму 15 с. Давление прессования – 150 Мпа – достигалось за 5...7 с, время выдержки под давлением регулировалось автоматически и составляло 40 с. Партию образцов помещали в рабочую камеру газостата, где, используя в качестве рабочей среды инертный газ (аргон), создали избыточное давление 100; 140; 180 и 200 МПа при температуре 460°C. Эта температура, по результатам экспериментальных данных, является оптимальной, с точки зрения обеспечения необходимой пластичности сплавов типа эвтектических силуминов [3]. Время выдержки под давлением варьировалось от 1 ч. до 3,5 ч. в каждом отдельном случае.

Для проведения сравнительных испытаний механических свойств отливок из сплава АЛ-25 была отлита в форму (являющуюся в данном случае кокилем) опытная партия заготовок без подпрессовки. Технология подготовки расплава и температура его заливки при литье в кокиль были аналогичны параметрам жидкой штамповки. Время затвердевания отливок при литье в кокиль 1,5...2 мин. Полученные по указанным технологиям цилиндрические образцы из сплава АЛ-25 термообработывали

по режиму: закалка в горячую воду после выдержки 3-х часов при 495°C, старение 6 ч. при 195°C, охлаждение на воздухе.

Для выяснения влияния режимов горячей изостатической обработки на механические свойства материала отливок испытывали шесть образцов в исходном состоянии и по три образца на каждый режим горячей объемной обработки. При механических испытаниях на растяжение определяли предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , временный предел прочности  $\sigma_b$ , относительное удлинение  $\delta$  и твердость НВ. Результаты механических испытаний образцов свидетельствуют о существенном влиянии горячей объемной обработки. Даже относительно кратковременная (60 мин) выдержка под давлением 140 МПа при 460°C обеспечивает значительное повышение механических свойств материала образцов (рис. 1).

Как показывают результаты экспериментальных данных, горячее изостатическое прессование позволяет повысить прочностные и пластические свойства жидкоштампованного силумина АЛ-25 до определенного уровня (точки 1 и 2 на рис. 1), при каждом конкретном значении создаваемого в газостате избыточного давления. Для исследуемого сплава указанное улучшение комплекса свойств наблюдалось до выдержки 3 ч. (180 мин), после чего кривая зависимости относительного удлинения принимала стабильный характер, а значения предела прочности даже несколько понижались. Естественно предположить, что выдержка под давлением в течение 3 ч. для повышения свойств сплава АЛ-25 является оптимальной.

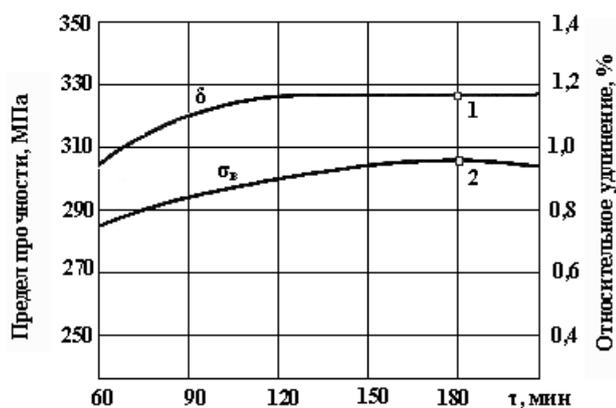


Рис. 1. Зависимость механических свойств сплава АЛ-25 после обработки при давлении 140 МПа и температуре 460°C от времени выдержки под давлением.

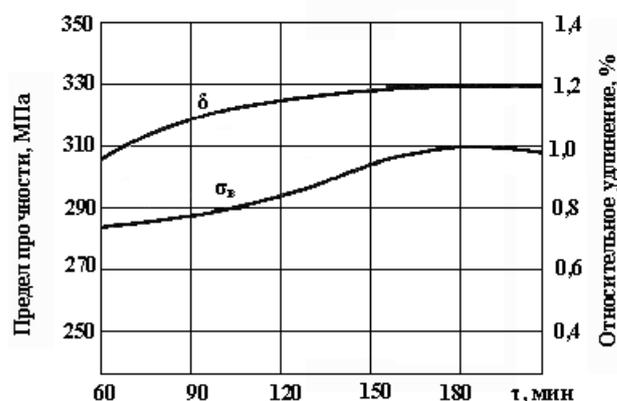


Рис. 2. Зависимость механических свойств сплава АЛ-25 после обработки в течение 3 ч. при температуре 460°C от величины прикладываемого давления.

На рис. 2 приведена зависимость механических свойств материала после обработки в течение 3 ч. при температуре 460°C от величины избыточного давления в камере газостата.

Результаты исследований свидетельствуют о сложном влиянии режимов обработки на механические свойства эвтектического силумина. Проведенные исследования позволили выбрать целесообразные технологические режимы горячей изостатической обработки жидкоштампованных отливок из сплава АЛ-25, для получения заготовок со значительно улучшенными свойствами материала. Сравнительный анализ механических свойств заготовок из сплава АЛ-25, в зависимости от технологии их получения представлены в табл. 1 (1 – литье в кокиль; 2 – жидкая штамповка (P =

150 МПа); 3 - жидкая штамповка (P = 150 МПа) с последующей ГСО (T = 460°C, P = 180 МПа, τ = 3 ч.).

Таблица 1.

Механические свойства материала отливок из сплава АЛ-25, полученных по различным технологиям

№ п/п	Технология получения отливок	Свойства			
		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
1	Литье в кокиль	220	220	0,5	107
2	Жидкая штамповка (P = 150 МПа)	250	240	0,85	120
3	Жидкая штамповка (P = 150 МПа) с последующей ГСО (T = 460°C, P = 180 МПа, τ = 3 ч.)	310	290	1,2	121

### Выводы:

1. Горячая изостатическая обработка отливок, полученных методом жидкой штамповки позволяет существенно повысить комплекс механических свойств материала (предел прочности на 19,5%, предел текучести на 17,2%, относительное удлинение на 29%, твердость – без изменения).

2. Оптимальными параметрами упрочняющего изостатического прессования для сплава АЛ-25 являются следующие: давление P = 150 МПа; температура T = 460°C, выдержка τ = 3 ч.

**Литература:** 1. Кашевник Л.Я., Белоусов Н.Н., Елизарова О.В. Применение алюминиевых сплавов для поршней двигателей внутреннего сгорания // Аналитический обзор за 1951-1983 гг. № 3625. ЦНИИИНФОРМАЦИИ. М., 1984. 2. Дзыбал Л.Т., Леховицер М.А. и др. Внедрение жидкоштампованных поршней из сплава АЛ-25 для дизелей 64 12/14 и 64Р 12/14 // Двигателестроение. 1985. №6, с. 43. 3. Шляхин А.П., Кулаков Ю.А. Залечивание пористости отливок горячим изостатическим прессованием // Кузнечно-прессовое производство, 1987, №2, с.8.

УДК 621.891

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРА ДИСПЕРСНЫХ ОКИСЛОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ

Олейник А.К. (г. Харьков, Украина)

*In the present work the influence of various oxides ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $MgO$ ) on the characteristics of pairs friction of materials of diesel engines is investigated.*

В настоящее время все большее применение находят различные добавки к смазочным материалам для улучшения показателей трения и износа деталей машин и механизмов. Использование таких добавок позволяет, в ряде случаев, существенно уменьшить потери на трение и изнашивание сопрягаемых поверхностей, а также восстанавливать размеры изношенных деталей в процессе штатной эксплуатации [1]. Наиболее перспективными в этом плане являются, так называемые, геомодификаторы трения (ГМТ), приготовленные на основе природных минералов (в основном, серпентинитов). К этому классу добавок следует отнести (по характеру действия) ультрадисперсные алмазы, получаемые путем детонационного синтеза [2].

Основными компонентами ГМТ являются различные окислы. Положительное

влияние твердых частиц в высокодисперсном состоянии на смазывающую способность масел двигателей внутреннего сгорания показано в работах С.В. Венцеля [3]. Существует несколько механизмов такого положительного влияния. Это повышение эффективной вязкости в тонких слоях смазочной пленки [4], микрополировка поверхностей трения, улучшение противоизносных и антиокислительных свойств масел [3]. Избыточное содержание свободной поверхностной энергии ультрадисперсных частиц обуславливает их участие в формировании вторичных защитных диссипативных структур [1, 5, 6, 7].

Формирование защитных диссипативных структур поверхностей трения является проявлением эффекта самоорганизации при трении в условиях неравновесных фазовых переходов, для начала которых требуется дополнительный подвод энергии или соответствующая «энтропийная накачка» [6, 7] при воздействии на систему по крайней мере двух независимых процессов. Включение дисперсных частиц в образующиеся слои рабочей поверхности повышает общее содержание энтропии, что может в соответствующих условиях трения способствовать возникновению неравновесных состояний и формированию диссипативных защитных структур. Очевидно, что ультрадисперсные частицы могут стабилизировать эти структуры, а также влиять на их свойства.

В настоящей работе исследовано влияние различных окислов ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $MgO$ ) на характеристики трения материалов сопряжения гильза - поршневое кольцо тепловозных дизелей типа Д100 и Д80. Испытывали серый легированный чугун СЧХНМД в виде «дисков» диаметром 50 мм в паре с образцами серийных поршневых колец с электролитическим хромовым покрытием. Испытания проводили на машине 2070СМТ-1 при ступенчатом нагружении в диапазоне общих нагрузок 0,2-1,0 кН. Смазывание осуществляли  $M14B_2$  путем однократной смазки образцов перед началом испытаний. Окислы в высокодисперсном состоянии вводили в смазку в количестве 0,01-0,1%.

Полученные результаты испытаний свидетельствуют, что введение окислов  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  приводят к повышению коэффициентов трения. При совместном введении окислов  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  происходит снижение коэффициентов трения до значений, соответствующих коэффициентам трения, полученных при испытаниях чистого масла. Дополнительное введение в масло, содержащее окислы  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$ , окислов  $MgO$  сопровождается заметным снижением коэффициентов трения до значений меньших, чем полученных при испытаниях масла с добавками окислов  $MgO$ . Выявленные зависимости свидетельствуют о взаимодействии исследованных окислов в зонах фактического контакта при трении, а также о влиянии компонентного состава добавок на это взаимодействие. Введением соответствующих составов в зону трения можно регулировать такие показатели как тепловыделение в контакте, скорость изнашивания и образование вторичных структур, что может быть использовано в процессе приработки и обкатки выпускаемых двигателей.

В связи с неизбежным отклонением размеров и форм деталей при изготовлении, сборке и работе двигателей, в начальные периоды их обкатки происходит макроприработка. Введение ГМТ, а также окислов, способствующих созданию вторичных защитных структур, на этом этапе может привести к стабилизации макроотклонений, что удлиняет период обкатки. На завершающих же этапах обкатки, когда происходит формирование рабочих структур поверхностей трения введение добавок

модификаторов будет способствовать созданию устойчивых защитных вторичных структур, сокращению периода приработки и снижению величин приработочного износа детали.

Таким образом, рациональное использование соответствующих окислов и ГМТ в различные периоды обкатки двигателя представляется более целесообразным, чем обкатка с однократным введением ГМТ в начальный период. Сочетание периодического использования соответствующих модификаторов трения в эксплуатации с применением их на завершающих стадиях обкатки может способствовать достижению безремонтности выпускаемых дизельных двигателях, что является весьма актуальной задачей в области двигателестроения.

**Литература:** 1. Войтов В.А., Стадниченко Н.Г., Джус Р.Н., Стадниченко В.Н., Билык А.П. Технологии триботехнического восстановления. Обзор и анализ перспектив//Проблемы трибологии.- 2005, № 2 - с. 86-94. 2. Долматов В.Ю. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза: свойства и применение//Успехи химии.- 2001 (70), №7 – с. 686-708. 3. Венцель С.В. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания.- М.: Химия. 1979 – 240 с. 4. Синха, Сингх. Теоретический анализ влияния присадок в виде твердых частиц на нециклически сдавливаемые пленки//Проблемы трения. Изд-во «Мир». 1983 (105), №1 – с. 76-82. 5. Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Бершадский Л.И., Караулов А.К. Надежность и долговечность машин. Киев: Техніка, 1975, 408 с. 6. Бершадский Л.И. О самоорганизации и концепциях износостойкости трибосистем//Трение и износ. 1992 (13), №6, -с.1077-1094. 7. Гершман И.С., Буше Н.А., Миронов А.Е., Никифоров В.А. Самоорганизация вторичных структур при трении//Трение и износ. – 2003 (24), №3 – с. 329-334.

**УДК 621.375.551.51**

## **ВИКОРИСТАННЯ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ РАДІОАКТИВНОГО ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ**

**Аксьонова С.І., канд. техн. наук, Грязєва Г.В., Каракуркчі Д.А.**  
(м. Харків, Україна)

*Review principle work and buildings optometrist electronic systems (OES) of the remote flexing (RF) of the contamination of atmosphere are observed. Principle of the action, the main schemes of lidar RF and prospects of the development to technologies are described. It is installed that existing lazer OES RF are capable to be used for determination of radioactive contamination and their parameter.*

Атмосферне забруднення антропогенного походження за деякими оцінками [1] складає 10..15 % загального складу навколишнього повітряного середовища та вимагає оперативного та повного контролю екологічної обстановки. Найбільш оперативно ця задача може бути вирішена за допомогою засобів дистанційного зондування атмосфери у оптичному та радіодіапазоні спектру. Серед дистанційних методів контролю забруднень важливішими є оптичні, внаслідок високої інформативності таких ефектів взаємодії оптичної хвилі з середовищем як резонансне поглинення у лініях молекулярного спектру та аерозольне (гідрозольне) розсіювання.

Метою статті є огляд схем дистанційного зондування забруднень атмосфери та викладення шляхів розвитку лідарних систем контролю повітряного середовища.

Оптичне зондування атмосфери, що засноване на пружному розсіюванні світла, фактично було започатковано ще до створення лазерів [1-3], але створення ефе-

ктивних та комерційно доступних оптичних систем дистанційного зондування стану природного середовища стало можливим тільки після винаходу лазерів. Такі характеристики вже перших рубінових лазерів, як висока потужність випромінювання і колимованість світлового пучку, зробили їх конкурентоздатними до лампових прожекторів, які використовували для зондування раніше. Розвиток методів модуляції добротності дозволив отримувати короткі лазерні імпульси й проводити просторово розрізненні вимірювання подібно до радарів – інтервал між часом відправлення лазерного імпульсу та часом повернення на приймач розсіяного сигналу можна зв'язати (через швидкість світла) з відстанню від лазерного передатчика до ділянки поверхні або елементарного об'єму атмосфери, на якому відбулось розсіювання.

Джерелом випромінювання, яке здійснює зондування в лідарі, є лазер. При дистанційному зондуванні атмосфери молекули газів й аерозолі викликають послаблення (зміну) лазерного випромінювання, яке проходить крізь неї. Частина лазерного випромінювання, яке здійснює зондування, розсіюється в зворотному напрямку (в бік прийомної системи лідара) на аерозольних частках, або віддзеркалюється від топографічних об'єктів або від спеціально встановлених екранів та віддзеркалювачів. Це випромінювання за допомогою приймальної оптики, що пропускає або віддзеркалює лазерний імпульс, збирається та спрямовується на фотодетектор, який перетворює його у електричний сигнал, що є пропорційним інтенсивності прийнятого оптичного випромінювання.

Величина сигналу визначається властивістю атмосфери розсіювати випромінювання, віддзеркалюючими характеристиками топографічних об'єктів або віддзеркалювачів, послабленням випромінювання на трасі зондування «лідар – об'єкт зондування – лідар». Тому електричний сигнал з фотодетектора містить інформацію про наявність газів й аерозолів, їх концентрації та відстань до об'єктів зондування. Для здобуття цієї інформації, необхідні спеціальні методи вимірювання та алгоритми обробки, через те що величина сигналу залежить від довжини хвилі лазерного випромінювання, кількості, розмірів, форми й оптичних властивостей аерозольних часток й молекул газів, які знаходяться на трасі зондування.

Як джерела випромінювання в лідарних системах дистанційного зондування використовуються лазери, які генерують у вузькому спектральному інтервалі короткі потужні імпульси з малою кутовою розбіжністю. Якщо лідар призначено для отримання з літального або космічного апарату карт розподілу параметру, необхідна висока частота повторення імпульсів.

Серед усього розмаїття лазерних випромінювачів прийнятними експлуатаційними характеристиками для використання у справі екологічного контролю є газові оптичні квантові генератори, які у порівнянні з рештою лазерів мають ряд наступних переваг [2]:

- можливість тривалої безперервної роботи без спеціальних охолоджуючих пристроїв;
- високий ступінь монохроматичності – наприклад, спектральна ширина випромінювання гелій-неонового оптичного квантового генератора може доходити до одиниць герц;
- висока стабільність та відтворюваність частоти, а також високий ступінь просторової та часової когерентності;

- малий кут розходження променю (біля однієї кутової хвилини);
- мала чутливість (висока стабільність робочих параметрів) до змін температури навколишнього середовища, що є особливо важливим у випадку неконтролюємих змін температури в межах 3...5°C;
- широкий діапазон робочих частот, від ультрафіолетової (УФ)–області до далекої інфрачервоної (ІЧ)–області.

Більшість лідарів мають приблизно схожу конструкцію, та відрізняються типом використаного лазера, комбінацією приймальних оптичних пристроїв та методикою виконання вимірювань [3]. До їх складу входять

- лазер-передатчик;
- оптична система, що передає зондуєчий промінь;
- приймальна оптична система;
- спектроаналізатор та фотоприймач;
- блок обробки сигналу;
- блок управління;
- поворотний пристрій;
- система відображення отриманої інформації.

Випромінювання, яке збирається приймальною оптикою, перед потраплянням до блоку детектування, проходить спектроаналізатор. Цей прилад призначений для виділення інтервалу довжин хвиль, у якому проводяться спостереження, й відповідно відсічки фонових випромінювань на інших довжинах хвиль. Спектроаналізатор представляє собою моно- або поліхроматор, тобто набір вузькополосних фільтрів. Вибір фотодетектора визначається спектральною областю спостереження, яка, у свою чергу, залежить від характеру випромінювання та типу лазера.

Всі відомі розробки ОЕС ДЗ стосуються визначення тільки суто хімічних забруднень, але у деяких випадках є необхідність оперативно оцінити рівень іонізуючих випромінювань без контакту з досліджуванним середовищем, тобто дистанційно. Рівні радіації можливо визначати косвено, за вмістом продуктів взаємодії іонізуючих випромінювань з атмосферним повітрям. Відомі співвідношення між потужністю дози й енергією гама-випромінювання та концентрацією продуктів радіолізу (радикалів, іон-радикалів кисню, води, оксидів азоту) дозволяють однозначно визначити основні параметри іонізуючих випромінювань.

Отже пропонується визначити рівні радіації за вмістом продуктів радіолізу з використанням існуючих ОЕС ДЗ, зокрема прийнятними джерелами випромінювання для такої задачі представляються оптичні схеми з лазерами на YAG:Er<sup>3+</sup> та CdSe з параметричним генератором світла та можливістю плавної перебудови довжини хвилі у діапазонах 0,2..0,4 і 8..13 мкм.

Перспективними шляхами розвитку технології дистанційного зондування забруднень атмосфери вважають пошук та випробування випромінювальної та приймальної оптики та напрацювання баз даних про спектри токсичних речовин у різних кліматичних районах, а також обґрунтування та дослідження оптимальних параметрів лазерного випромінювання.

**Література:** 1. Другов Ю.С., Беликов А.Б., Дьякова Г.А., Тульчинский В.М. Методы анализа загрязнений воздуха. – М.: Химия, 1984.– 384 с. 2. Полупроводниковая электроника: Справочник / Баранский П.И., Клочков В.П., Потыкевич И.В. – К.: Наукова думка, 1975. – 704 с. 3. Назаров И.М., Николаев А.Н., Фридман Ш.Д. Основы дистанционных методов мониторинга загрязнений природной среды. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 279 с.

**МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
П'ЄЗОСОРБЦІЙНИХ ДАТЧИКІВ ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН****Каракуркчі Д.А. (м. Харків, Україна)**

*In work are offered way of the improvement of the operating line piezoelectric sensor to account of the use as material of the sensor of the joining the type  $A_{III}B_V$ , using without contact design and principle to registrations of the reduction of the mass of the electoral covering.*

Для автоматизації технологічних процесів та для контролю хімічних забруднень навколишнього середовища необхідно відслідковувати усі аспекти стану контролюємого середовища у режимах on line та in suite з урахуванням вимог сучасної аналітичної хімії – зниження меж виявлення і підвищення точності, експресності і надійності аналізу [1]. Огляд публікацій останніх років показує, що у аналітичній техніці для створення високочутливих сенсорів та їх масивів для вимірювання концентрацій великого діапазону хімічних речовин широко використовуються сорбційно-частотні датчики.

Градувальна характеристика п'єзокварцових датчиків (рівняння Sauerbrey) встановлює, що чутливість зростає пропорційно квадрату початкової резонансної частоти датчика та знижується пропорційно значенню модуля Юнга та питомої ваги кристалу. Таким чином певний практичний інтерес становить пошук матеріалів датчика з відповідними значеннями вказаних параметрів.

Альтернативними матеріалами можуть стати напівпровідникові сполуки типу  $A_{III}B_V$  [2]. Сполуки цього класу використовуються для виготовлення надвисокочастотних приладів на принципі ефекту Гана. Ефект Гана полягає в тому, що під час приєднання постійного струму до монокристалу напівпровідника цього типу вольт-амперна характеристика після нетривалого зростання виконує різкий рух вниз та знов зростає, а потім з частотою порядку 100 300 ГГц повторює цей елемент, створюючи гармонічні надвисокочастотні коливання. У поєднанні з п'єзо ефектом, уявивши сорбційне покриття на такому датчику, а також усвідомлюючи, що резонансна частота сучасних кварцових датчиків, які отримали розповсюдження в аналітичній хімії, не перебільшує 20 МГц, отримано прогноз, що чутливість методу помітно зросте. Прогнозована швидкодія таких датчиків зростає, тобто впритул наблизиться до реєстрації елементарного акту адгезії молекулярних об'єктів на поверхні кристалу. Серед усіх напівпровідникових з'єднань типу  $A_{III}B_V$  найбільш придатним до застосування у галузі аналізу газів представляється арсенід галію. Позитивні риси цього виду кристалу [2] полягають у збереженні працездатності до температури біля 650 К, стійкості в агресивних середовищах, прийнятних показниках пружних постійних, зокрема в напрямку вісі симетрії  $m[11]$  (модуля Юнга) та питомої ваги. Основними недоліками інших представників цього типу напівпровідників є необхідність відводу теплоти та нестійкість у агресивних і навіть у деяких неагресивних середовищах.

Виходячи з рівняння Sauerbrey [3, 4], відношення квадратів резонансних частот кварцу та арсеніду галію дорівнює  $10^{-6}$ , тобто очікується підвищення чутливості сенсору, з досягненням теоретичної межі детектування зміни маси  $10^{-18}$  г.

Традиційну конструкцію п'єзосорбційного датчика з металевими омичними контактами може бути вдосконалено виходячи з наступних міркувань.

По-перше, очевидно, що металеве покриття електродів на тілі п'єзосорбційних

сенсорів знижує чутливість і точність датчика за рахунок зниження резонансної частоти і зменшення активної (сорбційної) поверхні.

По-друге, при вирішенні задач аналізу газових сумішей зі вмістом агресивних речовин, металопокриття (навіть такі як золото та платина) з високим ступенем вірогідності реагують з аналізованою фазою, що спричиняє додаткову погрішність виміру і підвищує знос датчика.

Варіанти вирішення цих проблем можливо запропонувати шляхом підбору матеріалу металу електродів, стійкого до дії агресивних середовищ і температур, виготовлення дірчастих електродів для збільшення активної площі датчика, але всі ці заходи спричиняють зниження робочих параметрів, підвищення вартості виробу, а також негативно вплинуть на надійність детектору.

Таким чином, раціональнішою конструкцією п'езорезонансного кристалічного сенсора представляється безелектродна конструкція. Такий датчик не має омичних контактів на робочому тілі п'езорезонаторного кристалу, а сигнал передається за допомогою поля в конденсаторі, діелектриком у якому є досліджена газова суміш та відповідно й сам сенсорний елемент.

Порівняно з традиційною схемою в запропонованій конструкції відсутні омичні контакти на безпосередньо самому кварцовому кристалі. Сенсор з чутливим покриттям жорстко закріплений на діелектричних утримувачах в конденсаторі, діелектриком в якому є аналізований газ. Робоча частота і корисний сигнал передаються за допомогою електричного поля через електроди утвореного конденсатора.

Відомі електричні схеми такого типу дозволяють передавати частоту заряду-розряду конденсатора близько  $10^2$  ГГц з використанням польових транзисторів в пульсуючому режимі з сильним негативним зворотним зв'язком [2]. Очевидно, що для уникнення негативного впливу на роботу датчика необхідно знижувати індуктивність контуру, що досягається шляхом підбору RC ланцюжка, і подавати на систему достатньо велику потужність. Очікуваний опір навантаження контуру – близько 10 МОм.

Елементарний розрахунок параметрів системи з безелектродним п'езосорбційним датчиком свідчить про його працездатність, високу функціональність та дозволяє зробити наступні висновки:

1. Індуктивність контуру потребує зниження для уникнення додаткової похибки від резонансного впливу індуктивності електричного вимірювального ланцюга на аналітичну ємність та сенсорний елемент.

2. Через порівняно велику електричну потужність сигналу необхідно передбачити шляхи відводу теплоти від робочого об'єму конденсатора; під час аналізу певного переліку речовин, необхідна підвищена температура реакційного середовища, і теплота від працюючого конденсатора може бути використана для термостатування.

3. Датчик повинен працювати в пульсуючому режимі з часом заряду, що приблизно дорівнює часу розряду та складає величину порядку наносекунди.

4. Відомі конденсатори, що використовуються в електротехніці, дозволяють досягти швидкодії (цикл заряду-розряду) біля  $10^{10}$  Гц.

Таким чином, безелектродна конструкція дозволяє покращити такі робочі характеристики п'езосорбційних датчиків як чутливість, точність вимірювання й технологічність виготовлення, а також розширити сферу застосування таких систем.

Удосконаленням напівпровідникового та п'езорезонаторного методу також

може служити підхід реєстрації зменшення, а не збільшення маси сорбційного покриття.

Описано величезна кількість сенсорів такого типу, де за збільшенням маси унаслідок сорбції (й як наслідок за зменшенням робочої резонансної частоти) визначають шукану речовину, але відсутні повідомлення про протилежний підхід.

Тобто, запропоновано замість чутливого сорбційного покриття, яке поглинає аналіт шляхом адсорбції (абсорбції, хемосорбції), наносити на напівпровідникову (п'єзоелектричну) пластину речовину, що при реакції з аналітом утворює летючу сполуку. Ця летюча сполука буде уноситися з поверхні сенсору, й таким чином змінювати концентрацію заряджених часток, або зменшувати його масу. Як наслідок, буде збільшуватися робоча резонансна частота, що дозволить вимірювати концентрацію відповідного реагенту.

Для вирішення певного переліку задач з практичного використання розглянутої технології у визначенні речовин, коли за певних фізичних умов (підвищені та, навпаки, низькі температура, тиск, вологість й т.ін.) та у присутності заважаючих компонентів неможливо використати сорбент, запропонований метод, прогнозовано, характеризується впевненими позитивними результатами.

Перспективними шляхами розвитку технології можуть бути розробка та випробування п'єзосорбційних датчиків визначення біологічно активних речовин та дослідження біморфних п'єзокерамічних елементів у сукупності з оптичною системою в режимах роботи на інфранизьких частотах.

**Література:** 1. Другов Ю.С., Беликов А.Б., Дьякова Г.А., Тульчинский В.М. Методы анализа загрязнений воздуха. – М.: Химия, 1984. – 384 с. 2. Полупроводниковая электроника: Справочник / Баранский П.И., Клочков В.П., Потыкевич И.В. – К.: Наукова думка, 1975. – 704 с. 3. Рудых И.А., Кораблев И.В., Иващенко В.Е. Сорбционно-частотные датчики для контроля состава газов. – М.: Машиностроение, 1989. – 226 с. 4. William H. King, Jr. Piezoelectric Sorption Detector. / Analytical Chemistry, – 1964, –Vol.36, №3, – P.1735 – 1739.

**УДК 621.981.1**

## **ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛОПАСТЕЙ ШНЕКОВ КОМПЛЕКСА «УД-БШК2ДМ»**

**Разиньков Н. А.** (г. Харьков, Украина)

*The manufacturing techniques by a method hot sheet moulding blades screws a complex «УД-БШК2ДМ» for the coal-mining industry, mastered on state factory «Factory of a name Malysheva».*

Основной проблемой топливно-энергетического комплекса Украины в настоящее время, в частности угольной промышленности, является повышение экономической эффективности существующих угледобывающих шахт. Поэтому на ГП «Завод им. Малышева» было освоено серийное производство комплексов «УД-БШК2ДМ», предназначенных для разработки «тонких» экономически неперспективных пластов угля. В процессе производства была разработана и освоена технология изготовления лопастей шнеков, являющихся основными рабочими органами данного комплекса.

Лопасть шнека (рис., б) представляет собой однозаходный виток винтовой геликоидной поверхности наружным диаметром 480мм, диаметром по валу 160мм и шагом 460мм изготовленная из стали 20 ГОСТ 1050-88.

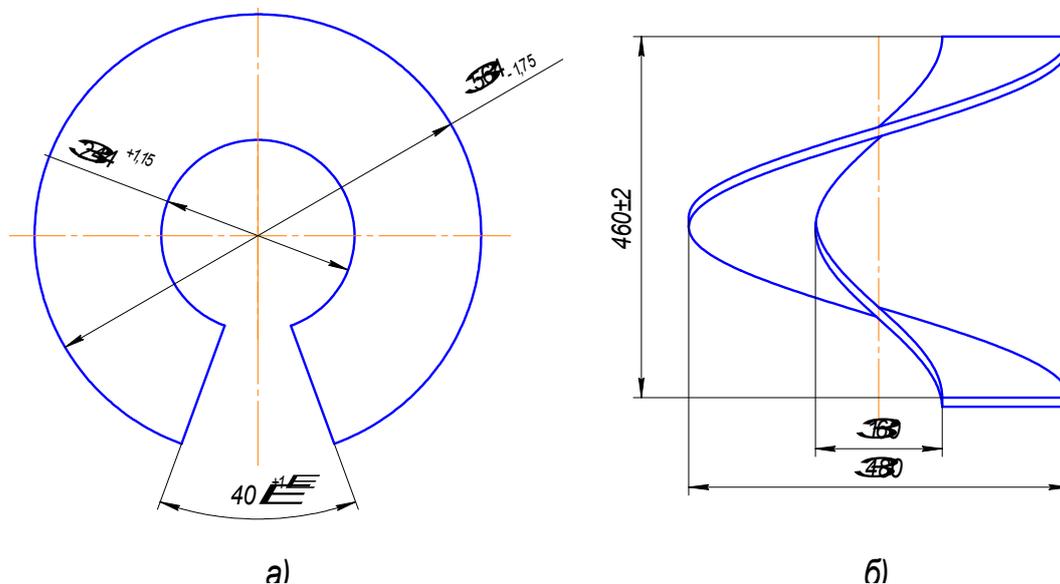


Рис. Схема технологических переходов формовки лопасти: а) - исходная заготовка; б) – отформованная лопасть.

Технология изготовления лопасти основана на использовании операции формовки в горячем состоянии листового сегмента с отверстием в центре (рис., а)), являющегося ее приближенной разверткой. Формовка производится в штампе. Усилие, потребное для пластического деформирования заготовки развивается гидравлическим прессом номинальным усилием на ползуне 15МН.

Штамп состоит из двух частей - верхней подвижной, и нижней неподвижной, сопрягающихся друг с другом по геликоидной поверхности, являющейся его рабочей фигурой (ручьём), а также деталей и элементов крепления к прессу. Рабочие части штампа – это две отливки, изготовленные из стали 35Л литьем в землю, с последующей доводкой фигуры шлифовальной машинкой. Штамп имеет направляющую колонку для направления верхней подвижной части и обеспечения совпадения ее фигуры по фигуре нижней неподвижной части. Крепление к прессу осуществляется: - к столу – пробками; - к ползуну – хвостовиком «ласточкин хвост» и клином.

Из листа толщиной 12мм при помощи ацетилено-кислородного резака вырезается развертка детали. Наплывы металла после резки по внутреннему и наружному контуру удаляются пологой вырубкой и зачисткой до металлического блеска.

Заготовка – развертка нагревается в газовой камерной печи до температуры 900-1000°С и подается на штамп к прессу. Центральным отверстием (по валу) она надевается на направляющую колонку штампа и фиксируется по верхней кромке разрезного сектора при помощи шпильки и клина с верхней кромкой рабочей фигуры нижней части штампа. Фиксированным ходом пресса на ~2/3 величины шага лопасти производится предварительная формовка лопасти, цель которой состоит в обеспечении правильной укладки заготовки в ручей по колонке, верхней и нижней кромкам за счет придания ей предварительной формы и увеличения площади контакта между ними. Затем клин и шпилька убираются и производится окончательная формовка лопасти с выдержкой под давлением 1-3мин. Затем лопасть переворачивается (кантуется) на 180° и обратно укладывается в штамп. Производится правка лопасти одним нажатием пресса. Готовая отштампованная лопасть (рис., б)) извлекается из ручья и укладывается на металлический пол по одной, где и остывает на спокойном воздухе до температуры окружающей среды.

**РАЗРАБОТКА СПОСОБА ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ  
ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ****Проволоцкий А.Е.,** докт. техн. наук, **Негруб С.Л.**

(г. Днепропетровск, Украина)

*The method of finish treatment is examined in the article, allowing to conduct effective preparation, polishing and intermediate treatment between transitions for the receipt of high-quality surface and coverages after the electro erosion methods of treatment. Development of method of finish treatment of details after electro erosion methods of treatment.*

В настоящее время в машиностроении используются электрофизические методы обработки поверхностей деталей. Эти методы делятся на две группы по признаку работы электрода - электроэрозионная размерная обработка и электроискровое легирование. Обработка ведется в зависимости от выбранной схемы обработки или с растворением металла заготовки или с нанесением расплавленного материала электрода на поверхность заготовки. В этих двух случаях происходит образование поверхности заготовки с разным ее качеством. В первом случае происходит растворение металла, переупрочнение поверхностного слоя с образованием «белого слоя», который сложен для дальнейшей механической обработки. Во втором случае происходит нанесение расплавленного материала на поверхность заготовки под воздействием электрического тока высокой плотности, а, следовательно, наносится неравномерно, при контакте расплавленного материала с окружающей средой происходит его окисление, образуются окислы, шлам, переупрочненные выступы. Таким образом, поверхность уже после первого прохода кажется полностью покрытой требуемым материалом. Однако, при очистке поверхности от загрязнений, оказывается, что сплошность покрытий значительно ниже требуемой. Возникает необходимость совершать дополнительные проходы для заполнения образовавшихся пропусков.

В свете изложенного, возникает вопрос о способе финишной обработки, который бы позволил проводить эффективную подготовку, очистку, доводку поверхностей на разных этапах обработки поверхностей электрофизическими методами.

Анализ источников [1-2] показал, что известны способы обработки таких поверхностей методом гидроабразивной обработки. Недостатками таких методов являются:

1. Зернистость абразивных частиц не регламентирована;
2. Выбор режимов резания может обеспечивать не только очистку поверхности от загрязнений, но и частично снимать нанесенный слой покрытия;
3. Абразивные частицы, попадающие в промежуток между двумя каплями металла, могут измельчаться о переупрочненные выступы микрорельефа поверхности и уже не осуществляют полезной работы;
4. Большой расход рабочей жидкости;
5. Из-за несоответствие зернистости абразивных частиц и их материала физико - механическим свойствам металла ухудшают качество поверхности путем повышения шероховатости поверхности после достижения заготовки абразивные частицы работают с низкой эффективностью;
6. Необходимость использования дополнительного вентиляционного оборудования;

7. Из-за наличия в рабочей жидкости абразивных частиц определенного диапазона, на поверхность наносятся риски, которые ухудшают качество поверхности путем повышения шероховатости поверхности после достижения необходимого уровня;

8. Не указанное время влияния жидкости на поверхность.

9. Каждый из рассмотренных способов можно применять только для одной из схем обработки.

Авторами предложен способ финишной обработки, который позволяет вести эффективную обработку поверхностей перед обработкой для получения качественного покрытия, во время обработки, когда необходимо качественно удалять переупрочненные выступы микрорельефа поверхности, шлам, окислы и другие загрязнения с целью открыть чистый металл и нанести на него новый слой. Также применение этого способа после электроэрозионной размерной обработки позволяет удалить «белый слой» перед дальнейшей механической обработкой в случае необходимости.

Поставленная задача решается тем, что во время выбора инструмента следует учитывать обрабатываемый материал и состояние поверхности полученной после электроискрового легирования или электроэрозионного размерного формообразования. Свойства инструмента обеспечат удаление «белого слоя» с поверхности после электроэрозионного размерного формообразования благодаря своей способности деформироваться в заданных границах, что позволяет вести гибкое управление параметрами процесса и достигать высокой производительности обработки. Благодаря универсальности инструмента не нужно применять дорогостоящее оборудование, возможно использование обычных универсальных станков, ручных шлифмашин или несложных устройств, которые позволяют закреплять инструмент в нужных комбинациях и др. В случае применения электроэрозионного многопроходного и однопроходного легирования для улучшения визуального контроля предлагается использовать такой инструмент с целью удаления наслоений окислительных пленок и шлака, что образовался во время обработки. Свойства инструмента позволяют подобрать не только зернистость абразивных частиц, но и размеры рабочих волокон инструмента для лучшего проникновения между впадинами и удаления из них шлака. Таким образом, достигается лучшее проникновение материала электрода во впадину при втором проходе, улучшается схватываемость материала электрода и основы.

В случае подготовки поверхности под восстановление методом электроэрозионного легирования необходимо провести детальный входной контроль детали, которая находилась в эксплуатации и удалить из нее продукты окисления, грязи и др. Инструмент, что нужно избрать для этой операции должен иметь такие свойства, чтобы не привносилось ухудшение состояния поверхности. Для этой цели хорошо подходит эластичный полимер - абразивный инструмент, чьи волокна хорошо проникают во все тяжело доступные места профильных поверхностей и хорошо очищают их даже на большой глубине. Все, высшее изложенное справедливо для плоских, внешних и внутренних цилиндрических та сложнопрофильных деталей.

Использование именно эластичного полимер - абразивного инструмента позволяет гибко руководить параметрами процесса, повысить качество удаления загрязнений и другое за счет эластичного полимер - абразивного волокна, которое способно деформироваться и принимать форму поверхности, что обрабатывается. Волокно способно работать торцами и внешней цилиндрической поверхностью, что

влияет на эффективность и интенсивность обработки.

Если использовать предложенный способ при обработке деталей, которые обрабатываются методом электроэрозионного размерного формообразования, то после собственно самого формообразования известными способами возникает необходимость улучшить качество полученной поверхности путем применения финишной доводки с целью уменьшения шероховатость поверхности. При использовании эластичного полимер - абразивного инструмента в качестве финишного инструмента необходимо выполнить правильный выбор его параметров и назначить режимы обработки. Волокна инструмента работают торцами волокон, что содержат в себе абразивные частицы назначенной зернистости расположенные равномерно по всему сечению волокна [3] или при необходимости и внешней цилиндрической поверхностью. При наличии начальной деформации волокна инструмента, его абразивная способность повышается и дает возможность выполнять обработку быстрее. При обработке сложнопрофильных поверхностей инструмент подбирают таким образом, чтобы он повторял форму поверхности после начальной деформации. Волокна заполняют собой все пустоты и позволяют одновременно обрабатывать несколько участков поверхности. Таким образом, инструмент осуществляет удаление с поверхности дефектного слоя, известного как «белый слой».

Если использовать предложенный способ при обработке деталей, которые обрабатываются методом электроэрозионного легирования, то необходимость в использовании указанного инструмента возникает как до, так и после обработки. Перед электроискровым легированием во время восстановления поверхностей деталей их нужно очистить от продуктов, которые образовались во время эксплуатации детали: ржавчины, масла и др.

**Литература:** 1. Nachbearbeitung Senrervdeirver Oberflächen //VDI z: Integr. Prod. – 1997 – 139, №1-2 –с. 12. – Нем. Место хранен. ГПНТБ России. 2. А.С. СССР 1653921. М.Кл.<sup>3</sup> В23 Н 9/00, В 24 С 1/00. 3. Патент №36833А, Украина, В24D17/00. Абразивное волокно/ Проволоцкий А.Е., Негруб С.Л. - 2000020807. – заявлено 15.02.2000; Опубл. 16.04.2001. - Бюл. №3. 4 с.

## **АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЛАТ КОМПЬЮТЕРОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

**Симсон Э.А.,** докт. техн. наук, **Назаренко С.А.,** канд. техн. наук,  
**Белозеров А.В., Марусенко С.И.** (г. Харьков, Украина)

*Complicated finite-element models and sensitivity analysis methods of dynamic characteristics are given in this article. Computation stages of constructions gradients functional derivation of the plates are investigated.*

Прогресс во многих областях науки и приборостроения неразрывно связан с высоким уровнем производства плат компьютеров. Необходимость подавления колебаний в этом случае обусловлена возможной потерей электрического контакта как внутри платы, так и контакта платы с периферией, при больших амплитудах колебаний, что может привести к аварийной ситуации[1]. Резонанс - это наиболее опасный, с точки зрения динамической прочности, и потому нежелательный для конструкций режим. Поэтому при проектировании плат компьютеров необходимо решать обратные задачи динамического синтеза - отыскания формы отдельных элементов и системы в целом, обеспечивающих "оптимальную отстройку" от резонанса[2].

Решение обобщенного уравнения колебаний плат компьютеров с варьируемыми

проектными переменными  $\bar{u}$  под воздействием гармонического возбуждения (или гармонической составляющей)

$$K(\bar{u})\bar{V} + \bar{R}\left[\bar{u}, \bar{V}, \dot{\bar{V}}\right] + M(\bar{u})\ddot{\bar{V}} = \bar{F}_c \cos \omega t + \bar{F}_s \sin \omega t, \quad (1)$$

для случая простого резонанса (разреженный спектр - малое трение) записывается в виде  $\bar{V} = a \cos(\theta)\bar{y}$ , где  $\bar{y}$  - нормированная резонирующая форма колебаний ( $\bar{y} \cdot M\bar{y} = 1$ ).

Решение задачи оптимизации конструкций в резонансном и околорезонансном состоянии сводится к исследованию функционалов, зависящих от резонирующей собственной (частоты и) формы колебаний  $J(\bar{u}, \bar{y})$ .

$$[K - \lambda M]\bar{y} = \bar{0}, \quad \lambda = \omega^2, \quad [K - \lambda M]\bar{\psi} = -\frac{\partial J}{\partial \bar{y}}. \quad (2)$$

Если рассматриваемый функционал зависит от нормировки резонирующей собственной формы  $\bar{y}^T \frac{\partial J}{\partial \bar{y}} = \mu^* \neq 0$ , то условие нормировки (например  $\bar{y}^T M \bar{y} = 1$ ) вовлекается в структуру соотношений анализа чувствительности и условий оптимальности:

$$[K - \lambda M]\bar{y} = \bar{0}, \quad [K - \lambda M]\bar{\psi} = \frac{\partial J}{\partial \bar{y}} - \mu^* M \bar{y}, \quad \bar{\psi}^T M \bar{y} = 0; \quad (3)$$

$$H = \bar{\psi}^T [K - \lambda M]\bar{y} - (J - \mu^* \bar{y}^T M \bar{y}), \quad \bar{\nabla}_u J = -\frac{\partial H}{\partial \bar{u}}$$

Возможна иная версия соотношений анализа чувствительности для случая простого резонанса, включающая производную собственного значения

$$\bar{\nabla}_u J = -\frac{\partial H}{\partial \bar{u}} + \frac{\partial \lambda}{\partial \bar{u}} \bar{\psi}^T M \bar{y} \quad (4)$$

и обладающая в силу

$$\bar{\psi} = k \bar{y} + \bar{\psi}_r, \quad \frac{\partial \lambda}{\partial \bar{u}} = \bar{y}^T [K' - \lambda M'] \bar{y} \quad (5)$$

фильтрующим свойством по отношению к общему решению сопряженной задачи.

Для случаев, когда частота гармонического нагружения  $\omega$  в обобщенном уравнении (1) достаточно удалена от ближайших собственных частот, можно пренебречь силами малого внутреннего трения. Матричное уравнение колебаний для косинусной и синусной составляющих нагрузки принимает вид:

$$[K(\bar{u}) - \omega^2 M(\bar{u})]\bar{y}_{c,s} = \bar{F}_{c,s}(\bar{u}). \quad (6)$$

Учитывая, что матрица динамической жесткости в этом случае - невырожденная, исходная и сопряженная задачи интегрального динамического функционала не содержат особенностей:

$$J = \int_0^T f(\bar{u}, \bar{y}_C \cos \omega t + \bar{y}_S \sin \omega t) dt = J(\bar{u}, \bar{y}_C, \bar{y}_S), \quad (7)$$

$$[K - \omega^2 M]\bar{\psi}_{c,s} = \bar{\nabla}_{c,s} J$$

$$\bar{\nabla}_c J = \frac{\partial J}{\partial \bar{y}_c}, \quad \bar{\nabla}_s J = \frac{\partial J}{\partial \bar{y}_s} \quad (8)$$

Выражение для гамильтониана и коэффициентов чувствительности приобретают следующий вид:

$$H = \sum_{C,S} \bar{\psi}_{C,S}^T [K - \omega^2 M] \bar{y}_{C,S} - \bar{\psi}_{C,S}^T - J$$

$$\bar{\nabla}_u J = \left\{ -\frac{\partial H}{\partial u_i}, i = \overline{1, n} \right\} \quad (9)$$

В случае линейного амплитудно - и частотно - независимого рассеяния энергии, когда амплитудные составляющие при резонирующих формах выражаются аналитически через те же собственные формы, резонансные характеристики выражаются явно в виде  $J_p = J(a_i, b_i, \bar{y}_i) = J(\bar{p}_i, \omega_i, \bar{y}_i) = J(\bar{y}_i, \omega_i)_{i=\overline{1, n}}$ .

$$[K - \lambda_i M] \bar{y}_i = 0; [K - \lambda M] \bar{y}_i = \frac{\partial J}{\partial \bar{y}_i} - \mu_i^* M \bar{y}_i; \quad (10)$$

Для случая совместного управления спектром резонансных частот (отстройка - настройка) и резонансным состоянием ( $J$ ):

$$H = \sum_{i=1}^N k_i \bar{y}_i^T [K - \lambda M] \bar{y}_i + \sum_{i=1}^N (\bar{\psi}_{q,i}^T [K - \lambda M] \bar{y}_i + \mu_i^* \bar{y}_i^T M \bar{y}_i) - J;$$

$$\bar{\nabla}_u J = \left\{ -H'_{uj}, j = \overline{1, n} \right\} \quad (11)$$

При этом  $N$  "общих гамильтонианов"  $H_i^0$  отвечает за управление собственными частотами  $\lambda_i = \omega_i^2, i = \overline{1, N}$ , а частный гамильтониан

$H_i^q = \sum_{i=1}^N (\bar{\psi}_{q,i}^T [K - \lambda M] \bar{y}_i + \mu_i^* \bar{y}_i^T M \bar{y}_i) - J$  за управление функционалом резонансного состояния в системе с плотным спектром (следствие  $\pi_\lambda$  - теоремы для случая "удержания" в решении обобщенного уравнения колебаний  $N$  резонирующих собственных форм). Если внутреннее демпфирование колебаний (рассеяние энергии в материале конструкции) носит выраженный характер, система уравнений метода энергогармонического баланса имеет вид

$$\bar{\Omega}(\bar{d}, \bar{y}_1, \dots, \bar{y}_N) = 0, \bar{d} = \{a_1, b_1, \dots, a_N, b_N\}. \quad (12)$$

Для случая нестационарных колебаний, когда решение матричного уравнения динамики записывается в виде:

$$\bar{V} = \sum_{i=1}^N \varphi_i(t) \bar{y}_i = \sum_{i=1}^N \frac{\bar{P}_i \bar{y}_i}{\bar{\omega}_i} \int_0^t f_i(\tau) e^{-n(t-\tau)} \sin \bar{\omega}_i(t-\tau) d\tau, \bar{\omega}_i = \sqrt{\omega_i^2 - n^2},$$

(для сокращения записи приняты нулевые начальные условия), динамический функционал в зависимости от физического смысла имеет форму, характерную для задачи Лагранжа или Майера:

$$J_L = \int_0^T f(\bar{V}) dt; J_M = f(\bar{V}(t^*)). \quad (13)$$

С целью демонстрации предлагаемого подхода приведем примеры решенных задач управления спектром колебаний. В качестве объекта исследования была выбрана плата КМ400-М2 (рис. 1.). Все элементы платы (процессор, микросхемы и т.п.) расположены на стеклотекстолитовой пластине толщиной 2·10-3 м. Модуль упругости стеклотекстолита 3,1·1010 Н/м2, плотность 1,8\*103 кг/м3, коэффициент Пуассона-

на  $\nu = 0.25$ . Размер платы  $0.2 \times 0.22$  м<sup>2</sup>. При расчете плата представляется в виде кусочно-однородной пластины. Для того чтобы как можно более полно отразить характер неоднородности платы, она была разбита на 442 КЭ типа shell63, имеющих соответствующие физико-механические и геометрические параметры, а также 5 КЭ типа mass21, т.е. сосредоточенные массы, которые заменили различные конструктивные элементы платы. Производные по проектным переменным (коэффициенты чувствительности) характеризуют направление и скорость изменения функционалов качества изделия при изменении этих переменных. Распределение полей коэффициентов чувствительностей собственных частот к нормальным перемещениям точек поверхности взаимодействующих конструктивных элементов приведено на рис. 1 и 2.

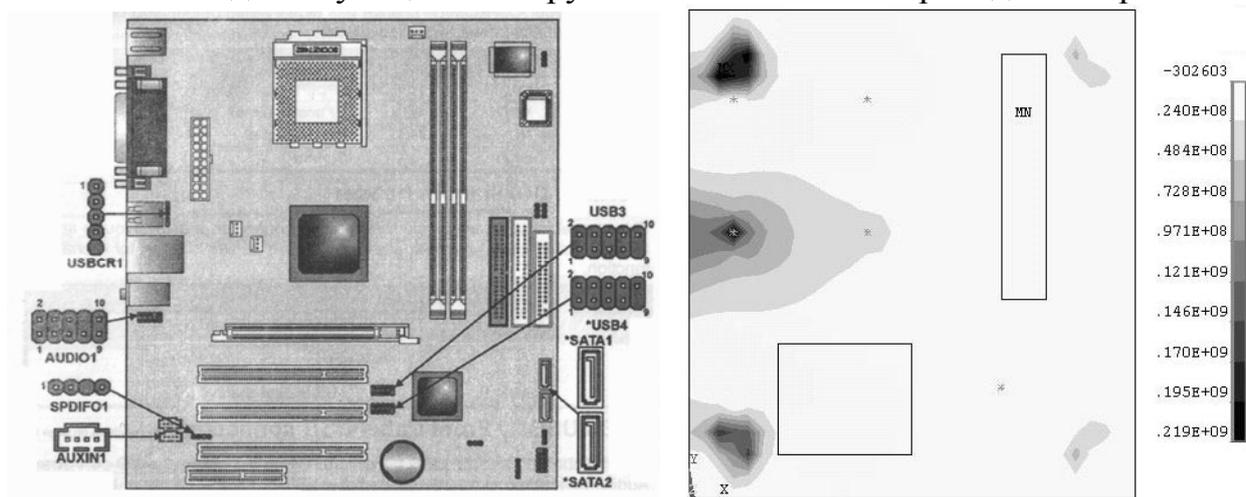


Рис. 1. Плата КМ400-М2. Анализ чувствительности 1 собственной частоты.

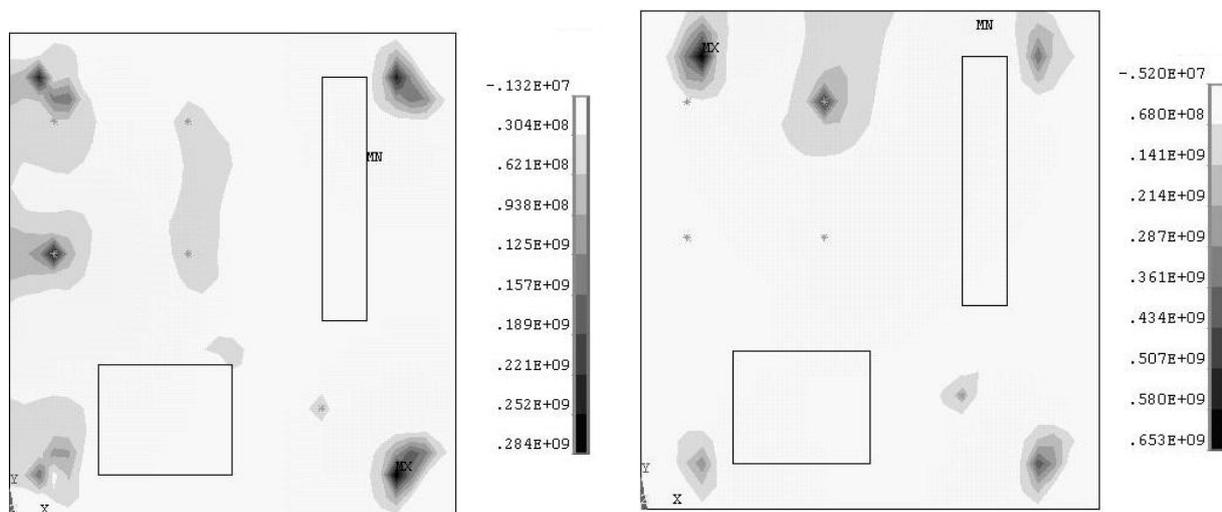


Рис. 2 Анализ чувствительности 2, 3 собственных частот.

Полученные результаты можно применить при проектировании, вибродиагностике и неразрушающем контроле, стохастическом анализе характеристик в поле случайных отклонений свойств материала и геометрических параметров, назначении полей допусков на изготовление, корректировке или идентификации математической модели конструкции плат компьютеров.

**Литература:** 1. Овчаренко В.В. Численный эксперимент по активному подавлению колебаний плат бортовых ЭВМ // Вестник ХГПУ. – 1998. - №27. - С. 178-182. 2. Богомолов С.И., Симсон Э.А. Оптимизация механических систем в резонансных режимах. - Харьков: Вища школа, 1983. - 152 с.

## АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Симсон Э.А., докт. техн. наук, Назаренко С.А., канд. техн. наук,  
Зюзин А.Ю., Любецкая В.Б., (г. Харьков, Украина)

*Complicated finite-element models and sensitivity analysis methods of dynamic characteristics are given in this article. Computation stages of constructions gradients functional derivation are investigated. The developed mathematical apparatus application domains of piezoelectric structures are examined.*

Необходимость дальнейшего углубленного изучения закономерностей статического и динамического деформирования пьезоэлектрических устройств определяется постоянно расширяющимися областями их применения. Наряду со ставшими традиционными областями применения (излучатели и приемники звука в гидроакустике, элементы зажигания, пьезотрансформаторы, линии задержки сигналов и полосовые фильтры, различные измерительные устройства), укажем на новые направления, например на использование керамических пьезопроводов в конструкциях микроволновых двигателей и волновых гироскопов, в устройствах деформируемых зеркал адаптивной оптики, на использование сопряженных поверхностных и объемных волн в устройствах акусто-электроники, на самоконтролирующиеся и самоуправляемые мехатронные системы на базе МЭМС[1-3].

На стадии проектирования к пьезоэлектрическим устройствам предъявляется большое число зачастую весьма противоречивых эксплуатационных и конструктивных требований. Среди них можно выделить наиболее существенные, которые определяют основные характеристики системы: - обеспечение заданной резонансной частоты в рабочем диапазоне; отсутствие "паразитных" резонансов в пределах диапазона автоподстройки частоты, в котором вследствие плотного спектра возможен захват форм с нежелательным типом колебаний; обеспечение заданной амплитуды; максимизация коэффициента преобразования; максимизация коэффициента полезного действия; максимизация или обеспечение заданного запаса электрической прочности в рабочем режиме; максимизация или обеспечение заданного запаса механической прочности; выполнение требований, связанных с особенностями технологического процесса; выполнение требований, связанных с характеристиками генератора; снижение габаритных размеров с учетом конструкционных ограничений на форму.

Проектирование пьезоэлектрического преобразователя связано с выбором геометрической формы пьезоэлемента, электродов, размеров в плоскости и распределения толщины. При этом первой задачей, возникающей при проектировании, является определение резонансных частот и форм колебаний. Однако практически отсутствуют работы, посвященные анализу чувствительности формы пьезоэлектрических преобразователей сложной пространственной геометрии. В работе ставится задача на единой научно-методологической основе решить задачи анализа чувствительности формы пьезоэлектрических устройств[4].

Уравнения пьезоэлектрической среды, отражающие взаимосвязь электрических и механических свойств пьезоэлектрика, будут иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \sigma^{ij} &= C^{ijkl} \varepsilon_{kl} - d^{ijm} E_m \\ D^i &= d^{oijk} \varepsilon_{jk} + \kappa^{il} E_l \end{aligned} \right\} \quad \text{- уравнения пьезоэффекта}$$

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{div} \vec{D} = 0 \\ E_i = -\phi_{,i} \end{aligned} \right\} \quad - \text{ квазистатические уравнения Максвелла}$$

$$\sigma^{ij}_{,i} + X_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2},$$

- уравнения движения элемента среды,

где  $\phi$  - потенциал электрического поля в пьезоэлектрике,  $X_i$  - объемные силы,  $u_i$  - механические перемещения,  $\sigma^{ij}$  - контравариантные компоненты тензора механического напряжения,  $\epsilon_{kl}$  - ковариантные компоненты тензора механической деформации,  $D^i$  - контравариантные компоненты вектора электрической индукции,  $E_m$  - ковариантные компоненты вектора напряженности электрического поля,  $C^{ijkl}$  - контравариантные компоненты тензора коэффициентов жесткости, измеренных при постоянной напряженности электрического поля,  $d^{ijm}$  - контравариантные компоненты тензора пьезоэлектрических коэффициентов, измеренных при постоянной механической деформации,  $d^{oijk}$  - контравариантные компоненты тензора пьезоэлектрических коэффициентов, измеренных при постоянной напряженности электрического поля,  $\kappa^{il}$  - контравариантные компоненты тензора коэффициентов абсолютной диэлектрической проницаемости, измеренных при постоянной механической деформации, точка над переменной означает производную по времени. Знак запятой с индексом после тензора означает ковариантную производную.

В работе используются трехмерные конечные элементы. При дискретизации аппроксимируются механические перемещения и электрический потенциал в пределах конечного элемента, используя интерполяционные функции. После применения вариационного принципа и конечноэлементной дискретизации, конечноэлементные соотношения в матричной форме для пьезоэлемента представляются в виде:

$$\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{U}\} \\ \{\ddot{V}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{U}\} \\ \{\dot{V}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [K^Z] \\ [K^Z]^T & [K^D] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U\} \\ \{V\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{L\} \end{Bmatrix},$$

где точка над переменной означает производную по времени,  $[M]$  - матрица масс;  $[C]$  - матрица демпфирования;  $[K]$  - матрица жесткости;  $[K^D]$  - матрица диэлектрической проницаемости;  $[K^Z]$  - матрица пьезоэлектрической связи;  $\{F\}$  - вектор механической нагрузки;  $\{L\}$  - вектор электрической нагрузки.

Для проверки достоверности разработанного математического аппарата была рассмотрена задача расчета и анализа чувствительности пьезоэлектрического преобразователя. Пьезокерамический преобразователь представляет собой куб с длиной грани 10 мм из материала PZT4 с поляризацией вдоль оси Z. Электроды размещены на поверхностях, ортогональных оси поляризации. Рассматриваются группы частот колебаний, соответствующих короткозамкнутой цепи (резонанс) и разомкнутой цепи (антирезонанс).

Подэлектродная область представляет собой эквипотенциальную поверхность и специальным образом не моделируется. Для короткозамкнутой цепи верхний и нижний электроды заземляются (напряжение на электродах равно нулю). Для случая разомкнутой цепи заземляется только верхний электрод. Случай короткозамкнутой

цепи представляет собой возбуждение преобразователя приложенным к электродам потенциалом, а случай разомкнутой цепи – возбуждение зарядом. Преобразователь моделировался четвертью куба с приложенными граничными условиями симметрии по поверхностям раздела.

Результаты сравнения эксперимента[5] и расчета показали хорошее соответствие (различие на первых 3 частотах не более 4%). Распределение полей коэффициентов чувствительностей собственных частот пьезоэлектрического преобразователя к нормальным перемещениям точек поверхности приведено на рис. 1. Показаны соответствующие формы колебаний.

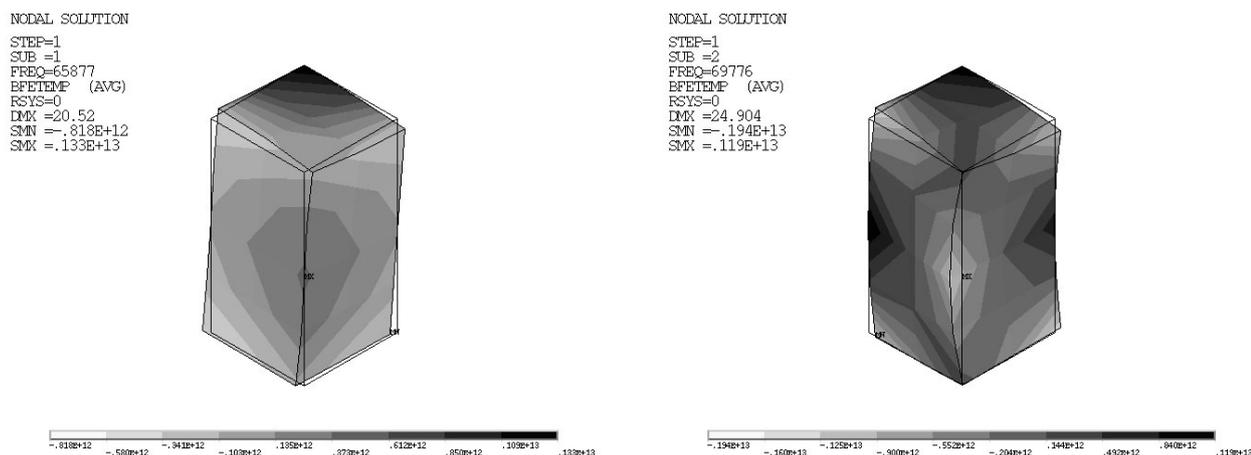


Рис.1. Анализ чувствительности 1, 2-ой собственных частот.

Рассмотрим задачу расчета собственных частот и анализа чувствительности высокочастотного пьезоэлектрического резонатора, заземленного по одной (нижней) грани.

Пьезоэлектрический резонатор разбивается на 3096 КЭ и 4390 узлов.

Распределение полей коэффициентов чувствительностей собственных частот высокочастотного кварцевого резонатора к нормальным перемещениям точек поверхности взаимодействующих конструктивных элементов приведено на рис. 2. Показаны соответствующие формы колебаний.

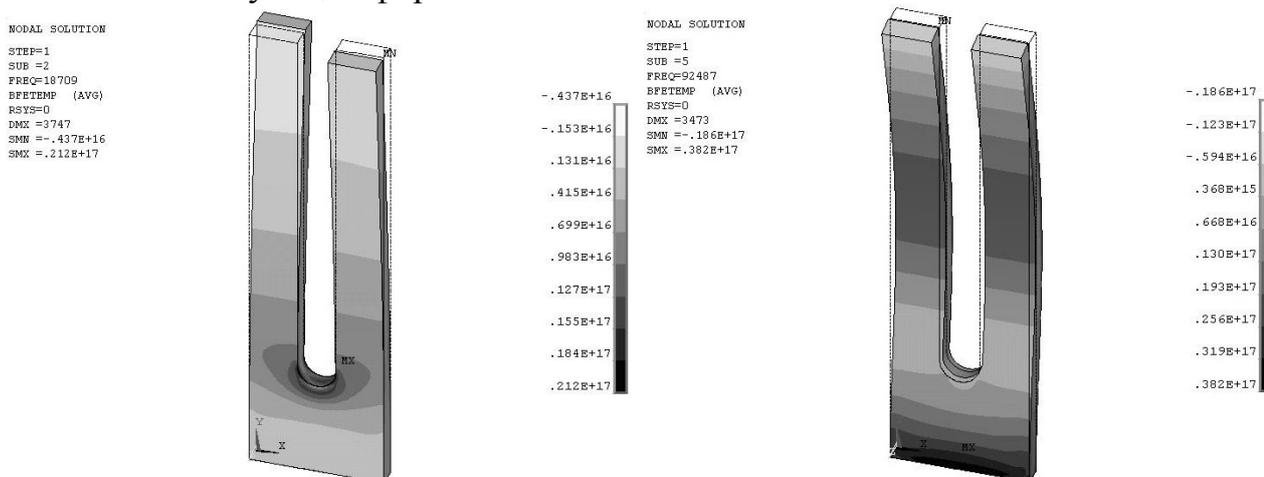


Рис.2. Анализ чувствительности 2, 5-ой собственных частот.

Данное исследование позволило разработать эффективный инструмент анализа чувствительности собственных частот пьезоэлектрических устройств и успешно апробировать его на ряде практических задач. Дальнейшим направлением исследо-

ваний является разработка математического аппарата оптимизации сильносвязанных электромеханических систем и применение его при проектировании ряда современных конструкций (например, сонотрода).

**Литература:** 1. M. I. Subbotin. Diagnostics of Piezoelectric Sensors from the Form of Their Decaying Resonance Oscillations // Measurement Techniques – 2003, Volume 46, Number 2. – p. 177-178. 2. P. Murali and J. Baborowski. Micromachined Ultrasonic Transducers and Acoustic Sensors Based on Piezoelectric Thin Films // Journal of Electroceramics – 2004, Volume 12, Number 1-2. – p. 101-108. 3. B. Xu and J. S. Jiang. Integrated optimization of structure and control for piezoelectric intelligent trusses with uncertain placement of actuators and sensors // Computational Mechanics – 2004, Volume 33, Number 5. – p. 406-412. 4. З. Симсон Э.А., Назаренко С.А., Зюзин А.Ю., Любецкая В.Б. Анализ чувствительности при комбинированном статико-динамическом нагружении конструкций. Вестник НТУ «ХПИ». Вып. 12, т.1. 2003. С. 125-129. 5. Allik, H., and Hughes, J. R.. Finite Element for Piezoelectric Vibration // International Journal Numerical Methods of Engineering, No. 2, 1970, pp. 151-157.

**УДК 621.923**

## **ПОВЫШЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ДЕЙСТВИЙ СОЖ ПРИ ШЛИФОВАНИИ**

**Степанов М.С.,** докт. техн. наук (г. Харьков, Украина)

*The methodology of investigation of the opportunity of maintaining the cutting power of an abrasive disc through its hydrofming by the high pressure jets has been substantiated.*

Технологическая эффективность СОЖ определяется интенсивностью ее функциональных действий. До настоящего момента были известны и исследовались следующие действия СОЖ: смазочное, охлаждающее, диспергирующее, демпфирующее. Однако СОЖ может выполнять и ряд других действий (например, деформирующее). Рациональное применение СОЖ может значительно усилить ее действия и тем самым повысить качественные параметры шлифуемой поверхности при высокой производительности обработки.

**Охлаждающее действие СОЖ** обуславливает изменение температурного поля в зоне контакта, снижение температурных деформаций и повышение точности обработки и стойкости шлифовальных кругов, а также качество поверхностного слоя. Параметры СОЖ, определяющие термическую способность отводить тепло следующие: теплопроводность, удельная теплоемкость, теплота испарения, смачиваемость и др. Мерой интенсивности отвода тепла является коэффициент теплоотдачи. Чем больше коэффициент теплоотдачи, тем лучше СОЖ отводит тепло от круга и заготовки [1]. Охлаждающее действие СОЖ значительно повышается при повышении давления подачи СОЖ. На интенсивность теплоотдачи влияет характер движения жидкости (ламинарный или турбулентный).

**Моющее действие СОЖ** проявляется в физико-химических, механических и гидродинамических процессах (при шлифовании выражается в отделении дисперсных продуктов от рабочих поверхностей шлифовального круга и удалении отходов шлифования из зоны контакта). Л.В.Худобин впервые показал влияние СОЖ на засаливание режущего профиля абразивного зерна, причем при очистке зерен значительно снижаются силы микрорезания [2]. Требования к моему действию СОЖ возрастают с уменьшением зернистости шлифовальных кругов, так как уменьшается расстояние между зернами – размеры пор. Моющее действие СОЖ оказывает боль-

шое влияние в первую очередь на стойкость круга и на его износ. Оно увеличивается с возрастанием скорости движения СОЖ при подаче под давлением. При плохой очистке СОЖ, содержащийся в ней шлам, может осаждаться на поверхностях инструмента. При шлифовании заготовок из алюминиевых сплавов шероховатость поверхности зависит от интенсивности засаливания. Потеря режущей способности круга, приводящая к увеличению шероховатости обработанной поверхности происходит за счет засаливания [3]. Повышая эффективность моющего действия СОЖ (например, путем гидроочистки) можно добиться снижения шероховатости поверхности (на определенных режимах).

**Смазывающее действие СОЖ.** Для уменьшения тепловой напряженности непосредственно в зоне резания важнейшее значение имеет не только охлаждающее, но смазывающее действие. Известны факты, когда применение масел в качестве СОЖ способствовало снижению количества прижогов, хотя водоземulsionные СОЖ обладают лучшим охлаждающим действием [4]. Смазывающее действие СОЖ проявляется в уменьшении работы трения давящих и режущих абразивных зерен, связки и отходов шлифования.

При повышении смазывающего действия может увеличиваться стойкость круга вследствие уменьшения его диффузионного изнашивания и засаливания:

- возрасти производительность обработки шлифованием;
- уменьшится шероховатость и волнистость обработанной поверхности;
- улучшится состояние поверхностного слоя;
- снизится контактная температура.

С повышением скорости резания и ужесточением режимов, влияние смазывающего действия СОЖ на процесс трения и изнашивания снижается, т. к. не успевают образовываться адсорбционные пленки.

**Диспергирующее (режущее) действие СОЖ** состоит в адсорбционном снижении прочности и пластифицировании материала заготовки. В основе проявления пластифицирующего и режущего действия СОЖ лежит эффект Ребиндера, представляющий собой совокупность явлений, заключающихся в изменении механических свойств твердых тел под влиянием поверхностных физико-химических процессов, вызывающих снижение поверхностной энергии твердого тела [5]. Применение эффективных средств подачи СОЖ способствует улучшению гидравлических характеристик, которые повышают проникающую способность СОЖ. При этом повышается стойкость круга. Это объясняется уменьшением температуры в зоне контакта, что обеспечивает резание с более твердыми абразивными зёрнами и связкой круга. Кроме того, охлаждающая жидкость, попадая в зону резания на нагретую до высоких температур поверхность абразивных зерен, вызывает после их выхода из зоны резания откалывание от них микроскопических частиц, т.е. происходит образование новых режущих кромок, или самозатачивание.

**Демпфирующее действие СОЖ.** В процессе резания вследствие неоднородности металла и упругой системы связки в круге, абразивное зерно вибрирует, приоткрывая зону контакта с обрабатываемой поверхностью. Непрерывно-поступающая СОЖ, попадая в приоткрытые полости зоны контакта, выполняет роль своеобразного демпфера, смягчая удар зерна (круга) об обрабатываемый материал. Демпфирующее действие СОЖ подразумевает создание или наличие вязкого сопротивления свободным колебаниям в технологической системе. СОЖ также влияет на демпфи-

рование технологической системы в целом. Особенно это важно при переходе на тонкие режимы шлифования. При этом демпфирование не столько уменьшает средний уровень вибраций, сколько ускоряет процесс их снижения. При предварительном шлифовании, где действуют силы резания, значительно превосходящие гидродинамические силы жидкости, влияние СОЖ на изменение амплитуды колебаний достаточно ограничено. Демпфирующие (упругие) свойства жидкостей определяются их вязкостью, давлением и температурой. Практика показывает, что применение углеводородных СОЖ по сравнению с водоземulsionными, способствует некоторому снижению амплитуды колебаний (особенно при окончательном шлифовании) [6]. Эффективность демпфирующего действия определяется также формой стыковой (клиновой) зоны круга и заготовки, которая определяется схемой шлифования.

Все выше перечисленные действия СОЖ определяются ее проникающей способностью. Механизм проникающего действия СОЖ при резании был и остается предметом многочисленных исследований [7]. Проникающая способность СОЖ зависит как от ее физических свойств, так и от способа подвода жидкости в зону шлифования. Причем, как показывают, исследования проникающая способность СОЖ многократно усиливается наложением на режущий инструмент вынужденных колебаний [8]. Наличие вибраций способствует повышению эффективности действий СОЖ [9]. Исследования показали, что скорость течения жидкости увеличивается при наложении на капилляр колебаний в осевом направлении. Причем основным параметром, определяющим повышение интенсивности капиллярного движения, является ускорение колебательного движения. При импульсном гидродинамическом воздействии струи СОЖ возникают процессы характерные для вибрационного шлифования. При этом изменяется кинематика резания абразивными зернами, облегчается съём металла и стружкообразование, улучшается самозатачивание и очистка круга от отходов шлифования [10]. По данным работы [11] при использовании способов вибрационного шлифования стойкость круга и точность обрабатываемой заготовки возрастает до трех раз, а высота неровностей на обрабатываемой поверхности снижается с 0,17 до 0,08 мкм. При вибрационном полировании мягкими кругами можно обеспечить шероховатость  $R_a < 0,04$  мкм.

Впервые попытка количественно оценить интенсивность функциональных действий СОЖ при шлифовании была предпринята в работе [6]. Автор предложил оценивать эффективность функциональных действий СОЖ по отношению к шлифовальному кругу, заготовке (из материалов различных групп шлифуемости) и к клиновой зоне. Приняв эффективность какого либо функционального действия СОЖ по отношению к шлифовальному кругу или заготовке за 100%, он разделил этот эффект между ее составом и способом подачи в зону шлифования. Однако соответствующие функциональные свойства СОЖ, какими бы они не были высокими в процессе обработки зависят не только от состава и способа подачи СОЖ в зону резания. Степень реализации технологического потенциала СОЖ зависит, и от эффективности очистки СОЖ ( $\mathcal{E}_k^{ОЧ}$ ,  $\mathcal{E}_3^{ОЧ}$ ), и от способа очистки рабочей поверхности шлифовального круга ( $\mathcal{E}_k^{ГОК}$ ,  $\mathcal{E}_3^{ГОК}$ ). Поэтому зависимости, приведенные в [6] с учетом выше изложенного можно переписать в виде

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_k &= \mathcal{E}_k^c + \mathcal{E}_k^T + \mathcal{E}_k^{ГОК} + \mathcal{E}_k^{ОЧ} = 100\% \\ \mathcal{E}_3 &= \mathcal{E}_3^c + \mathcal{E}_3^T + \mathcal{E}_3^{ГОК} + \mathcal{E}_3^{ОЧ} = 100\%\end{aligned}$$

Принята, с некоторыми дополнениями разработанная классификация [12] материалов по обрабатываемости шлифованием. Группу VII составляют титановые сплавы BT1-0, BT22 и др.[6], а группу VIII алюминиевые сплавы АК4М4 и др.

Таблица

$\mathcal{E}_k^c, \%$					$\mathcal{E}_k^T, \%$					$\mathcal{E}_k^{GOK}, \%$			$\mathcal{E}_k^{OC}, \%$		
Для групп шлифуемости материала заготовки															
I	II-III	IV-V-IV	VII	VIII	I	II-III	IV-V-IV	VII	VIII	I	II-III	IV-VIII	I-III	IV-VII	VIII
Охлаждающее действие СОЖ															
30	25	20	18	28	55	59	60	62	50	12	13	15	3	5	7
Моющее действие СОЖ															
30	26	18	18	15	20	23	25	25	25	45	46	50	5	7	10

Анализ таблицы показывает, что, изменяя параметры подачи СОЖ, параметры гидроочистки круга и очистки СОЖ, можно, оставляя прочие факторы неизменными определенным образом воздействовать на процесс шлифования за счет усиления того или иного функционального действия СОЖ.

Используя структурную схему (рисунок) можно определить наиболее перспективные пути для усиления того или иного действия.

Для повышения проникающей способности СОЖ с целью усиления ее действий можно использовать комбинированную обработку [13]. Это устройство не только дает возможность одновременно шлифовать и раскатывать внутреннюю поверхность заготовки, но и способствует увеличению давления подачи СОЖ в зону контакта, что значительно усиливает охлаждающее действие. Повышению эффективности проникновения СОЖ в зону контакта способствуют вибрационные колебания заготовки под действием струи СОЖ [14]. Такое шлифование сопровождается изменением во времени глубины резания и толщины среза.

**Деформирующее действие СОЖ** (вместе с проникающей способностью) усиливается при использовании устройства для подачи СОЖ при шлифовании длинномерных заготовок, в том числе с наружной винтовой поверхностью [15]. Нижняя подача СОЖ (подача СОЖ на выходе из зоны контакта) стимулирует диспергирующее действие, так как резкое охлаждение зерен вызывает скалывание на их рабочей поверхности [16]. Одной из возможностей повышения точности шлифованных валов в продольном сечении за счет усиления деформирующего действия СОЖ является способ, предусматривающий приложение дополнительной радиальной силы, созданной давлением струи СОЖ на поверхность заготовки и действующей в направлении, противоположном действию радиальной составляющей силы резания [17].

Этого же эффекта можно добиться за счет использования специальной конструкции кожуха шлифовального круга [18]. Подача СОЖ в узкие торцевые зазоры между кругом и стенками кожуха, способствует возникновению осевой гидродинамической силы, обеспечивающей соответствующий прогиб шлифовального шпинделя. Усиление моющего действия обеспечивается применением гидроочистки рабочей поверхности круга струями СОЖ высоких давлений [19,20].

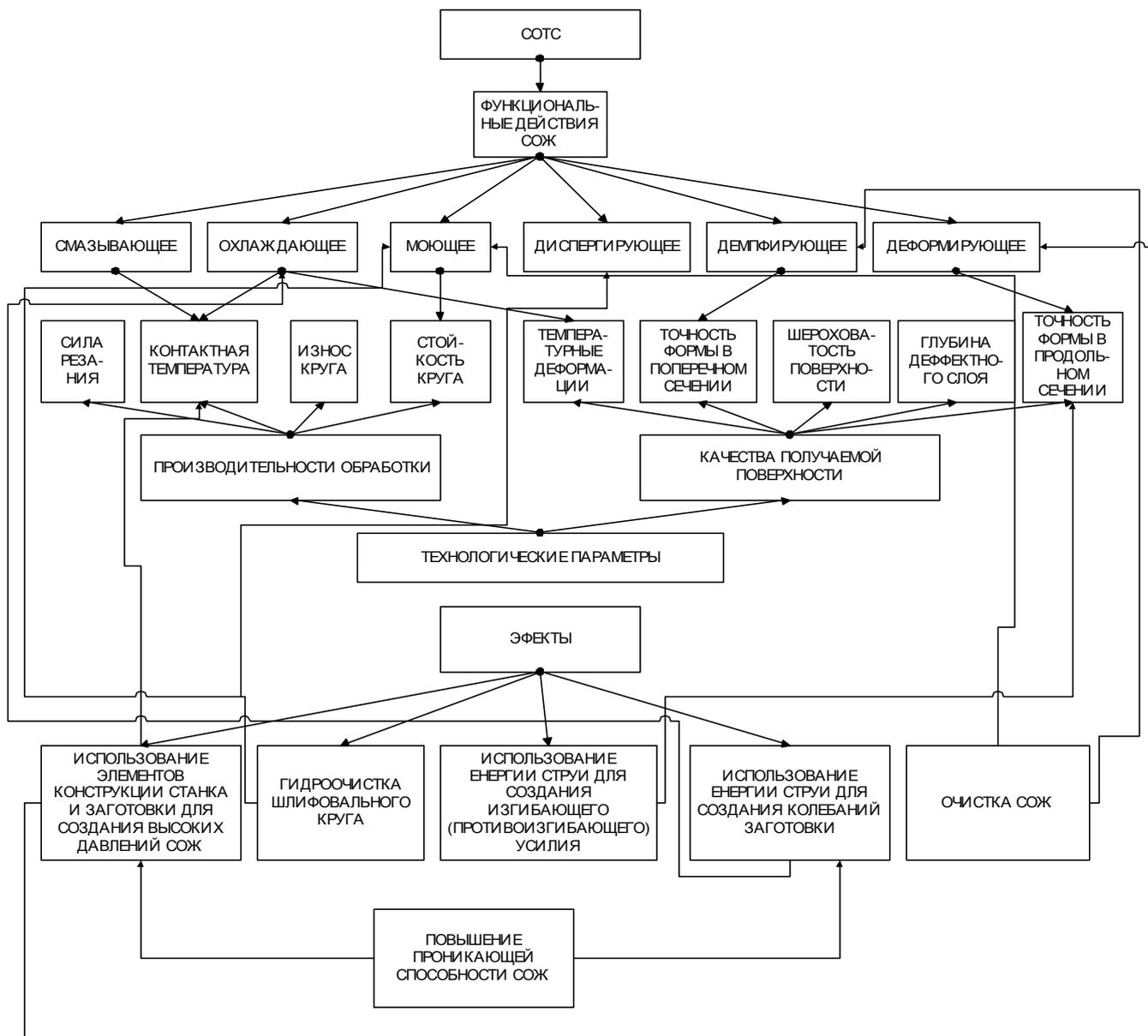


Рисунок. Обобщенная структурная схема обеспечения технологических параметров шлифования.

Таким образом, на базе проведенных исследований разработаны практические рекомендации, которые позволяют на их основе решать комплексную задачу обеспечения функциональных действий СОЖ предпочтительными средствами их применения для шлифования материалов различной обрабатываемости.

**Литература:** 1.Чулук А.И. Термический анализ эффективности действия СОЖ.-М.: ВНИИТЕМП, 1988.-40с. 2.Худобин Л.В. Смазочно-охлаждающие средства, применяемые при шлифовании. - М.: Машиностроение, 1971. -214с. 3.Правиков Ю.М. Влияние засаливания абразивного круга на шероховатость деталей из алюминиевых сплавов. //Смазочно-охлаждающие жидкости в процессах абразивной обработки.- Саратов, 1983. с. 20-23. 4. Редько С.Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов. - Саратов,1962.- 232 с. 5. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсионных системах. Физико-химическая механика. - М.: Наука,1979. -381с. 6.Худобин И.Л. Управление процессом шлифования путем рационального применения СОЖ. // Вестник машиностроения. 1988 №3 с. 28-30. 7.Латышев В.Н. Повышение эффективности СОЖ. - М.: Машиностроение, 1975. - 89с. 8.Пастунов В.А. и др. Некоторые закономерности действия СОЖ при обычном и вибрационном резании. //Разработка и применение СОЖ при резании металлов.- М.: МДНГП, 1966, с. 14-20. 9.Подураев В.Н. Обработка резанием с вибрациями. - М.: Машиностроение, 1970. – 352с. 10.Суворова Т.И. Эффективность применения ультразвука при точении

и шлифования вольфрама и сплава на его основе. // Эффективность применения ультразвука в машиностроении. Тез. док. научн. тех. - Алма-Ата: ДНТП, 1971, с. 8-13. 11. Полянкин В.А., Храмов Е.П. Внутреннее шлифование с регулируемыми колебаниями шлифовального круга: Инф. лист №13 – 82 – Саратов: ЦНТИ, 1982. – 4с. 12. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. - М: Машиностроение, 1974.- 208 с. 13. Патент України на винахід №43691 В24В МКл<sup>7</sup> 55/02 “Пристрій для кінцевої, з використанням змащувально-охолоджувальної рідини, обробки внутрішніх циліндричних поверхонь” / М.С. Степанов, О.Л. Коваленко, Борисов Д.В., Мішустін Д.Б., Морозов Р.В., -2001053216. Опубл. 17.12.2001. Бюл. №11. 14. Степанов М.С. Закономерности изменения кинематических параметров шлифования и давления подачи СОЖ при импульсном воздействии струи на поверхность заготовки. Резание и инструмент в технологических системах. №62, 2002, с. 114-118. 15. Патент України на винахід №46497 В24В МКл<sup>7</sup> 55/02 “Пристрій для подачі змащувально-охолоджувальної рідини під час шліфування довгомірних заготовок” / М.С. Степанов, А.М. Онищенко, Є.О. Шевченко, -2001075362. Опубл. 15.05.2002. Бюл. №5. 16. Степанов М.С. Подача СОЖ при скоростном прерывистом шлифовании. // Вестник НТУ «ХПИ». Вып. 6, 2002, с. 241 - 244. 17. Stepanov M.S. Parameters control of an exactitude of longitudinal grinding by influence grinding fluid on perform. 2<sup>nd</sup> International Conference “Research and Education”. Results of the SCIENTIFIC COOPERATION between the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” and University of Miskolc. 2004, Miskolc. p145-151. 18. Степанов М.С. Управление параметрами точности продольного шлифования воздействием СОЖ на шлифовальный круг. // Вісник ХДТУСГ. ”Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні”. Вип. 26, -Харьков, 2004. с. 143-149. 19. Заявка на винахід (корисну модель). №2004032045. Гідравлічна система нагнітання змащувально-охолоджуючої рідини (ЗОР). Степанов М.С. и др. 20. Степанов М.С., Калиба Е.Г. Технологическая эффективность гидроочистки круга при шлифовании. // Резание и инструмент в технологических системах. №63, 2002. с. 150-156.

**УДК 621.313:62.192**

## **ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

**Петков А.А.**, канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)

*The hierarchical structure of parametrical synthesis of digit circuits of high-voltage pulse test devices is offered. The lines of investigation for its realization are determined.*

В настоящее время значительное внимание уделяется испытаниям электротехнического и электронного оборудования на стойкость к воздействию мощных электромагнитных факторов искусственного и естественного происхождения. Испытания такого рода проводятся с помощью высоковольтных импульсных испытательных устройств (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.

ВИИУ – это высоковольтное устройство, предназначенное для формирования (в его нагрузке) нормативного импульсного воздействия, длительность которого меньше рассматриваемого промежутка времени и соизмерима со временем распространения электромагнитного поля в габаритах ВИИУ. В настоящей работе рассматривается класс ВИИУ, импульсное воздействие которых представляет собой импульс тока, напряжения, электромагнитного поля или его составляющих и конструктивно выполненных на базе емкостных накопителей энергии.

Целью настоящей работы является разработка иерархической структуры моделей параметрического синтеза разрядной цепи ВИИУ.

Разрядная цепь ВИИУ представляет собой совокупность компонентов и нагру-

зки, гальванически связанных между собой определенным способом и предназначенных для формирования в нагрузке требуемого импульсного воздействия. Под компонентом разрядной цепи будем понимать физический объект, включаемый в разрядную цепь и обладающий набором свойств, проявляющихся при протекании тока: активным сопротивлением, индуктивностью, емкостью (например, резистор, катушки индуктивности, конденсатор, разрядник и т.п.). Соединение компонентов в разрядной цепи ВИИУ осуществляется как параллельное и/или последовательное соединение ветвей, состоящих из последовательно соединенных компонентов. Основное свойство ВИИУ рассматриваемого класса состоит в том, что в наборе компонентов разрядной цепи обязательно присутствуют разрядники и накопительные конденсаторы, в которых изначально накапливается электрическая энергия.

Для описания переходных процессов на начальном этапе проектирования используются эквивалентные электрические схемы, которые состоят из элементов разрядной цепи – идеализированных объектов, обладающих одним свойством, проявляющимся при протекании тока (например, R – элемент - элемент, обладающий только активным сопротивлением, L – элемент - элемент, обладающий только индуктивностью и т.п.). Принцип эквивалентности заключается в следующем: величина параметра каждого элемента ветви является результатом эквивалентного преобразования (согласно законам электротехники) соответствующих параметров компонентов, входящих в эту ветвь.

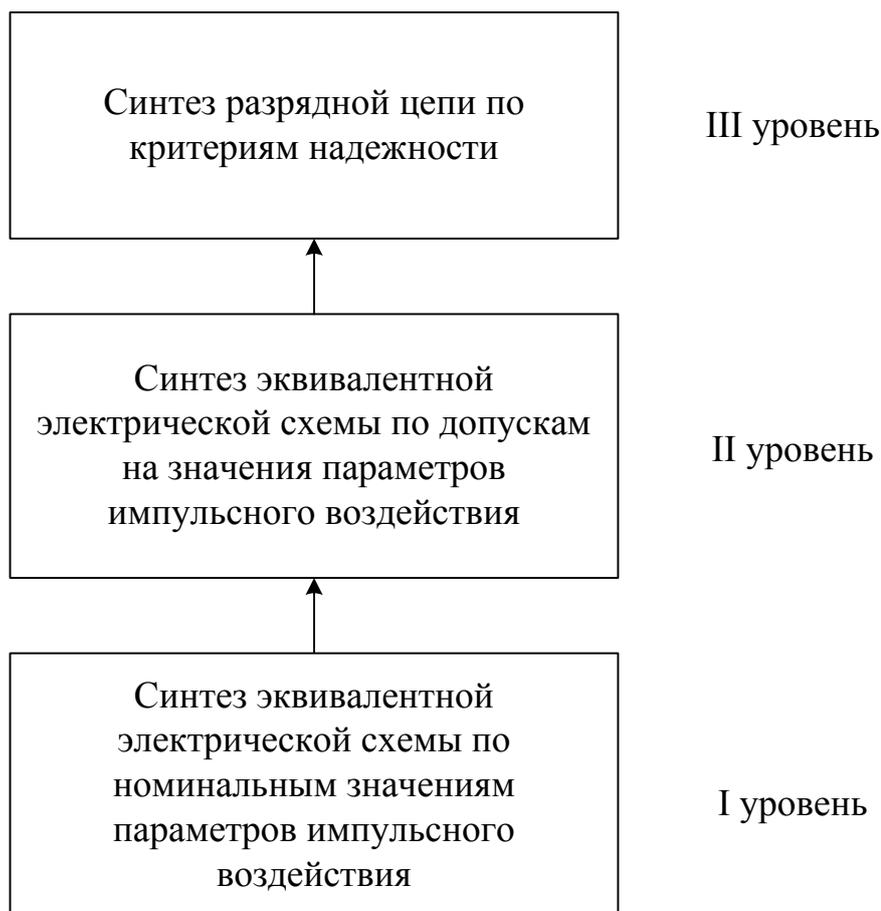


Рис. 1. Иерархическая структура параметрического синтеза разрядной цепи высоковольтного импульсного испытательного устройства.

общем случае имеют вид

Как показывает опыт проектирования ВИИУ, наиболее эффективной является последовательность проектных процедур параметрического синтеза разрядной цепи, представленной на рис. 1.

На I уровне осуществляется выбор величины параметров элементов разрядной цепи, реализация которых обеспечивает формирование импульсного воздействия с номинальными значениями параметров. Математические модели набора параметров элементов в

$$\overline{P_E} = F(\overline{P_{IV}}, \overline{P_N}), \quad (1)$$

где  $\overline{P_E}$  - набор значений параметров элементов разрядной цепи;  $\overline{P_{IV}}$  - набор значений параметров импульсного воздействия;  $\overline{P_N}$  - набор значений параметров нагрузки;  $F(\cdot)$  – оператор, определяемый конкретным видом схемы ВИИУ.

В настоящее время математические модели данного уровня достаточно полно разработаны только для генераторов импульсов тока [1 - 4].

На II уровне осуществляется выбор величины допусков параметров элементов разрядной цепи, реализация которых обеспечивает формирование импульсного воздействия с значениями параметров, находящимися в заданном диапазоне. Математические модели набора допусков величин параметров элементов в общем случае имеют вид

$$\overline{D_E} = \varphi(\overline{P_E}, \overline{P_{IV}}, \overline{P_N}, \overline{D_{IV}}, \overline{D_N}), \quad (2)$$

где  $\overline{D_E}$  - набор допусков значений параметров элементов разрядной цепи;  $\overline{D_{IV}}$  - набор допусков значений параметров импульсного воздействия;  $\overline{D_N}$  - набор значений параметров нагрузки;  $\varphi(\cdot)$  – оператор, определяемый конкретным видом схемы ВИИУ.

На III уровне осуществляется выбор компонентов разрядной цепи, использование которых обеспечивает формирование требуемого импульсного воздействия в течение заданного срока эксплуатации с заданным уровнем надежности.

$$\overline{N_K} = \Psi(\overline{P_E}, \overline{P_{IV}}, \overline{P_N}, \overline{D_E}, \overline{D_{IV}}, \overline{D_N}, \overline{Q_{IV}}), \quad (3)$$

где  $\overline{N_K}$  - набор компонентов разрядной цепи;  $\overline{Q_{IV}}$  - набор показателей надежности формирования импульсного воздействия;  $\Psi(\cdot)$  - оператор, определяемый конкретным видом схемы ВИИУ.

В настоящее время задачи II и III уровней в общем виде не решены. Отдельные элементы решения рассмотрены в [5, 6]. Для реализации предложенной иерархической структуры необходимо провести исследования обеспечивающие построение соотношений (1) – (3).

**Литература:** 1. Петков А.А. Выбор параметров разрядной цепи генератора импульсов тока при разряде на последовательную активно-индуктивную нагрузку // Электротехника. – 1990. - №10. – С. 35 – 36. 2. Петков А.А. Формирование испытательных импульсов тока сложной формы // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Электроэнергетика и преобразовательная техника. – Харьков: НТУ "ХПИ". - №4. – 2004. – С.22 – 30. 3. Петков А.А. Расчет параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных испытательных устройств, формирующих импульсы апериодической формы // Электротехника та електроенергетика. - 2005. - №1. – С. 65 - 69. 4. Петков А.А. Формирование испытательного импульса тока в активно-индуктивной нагрузке // Электротехника. - 2006. - №4. – С. 34 - 37. 5. Петков А.А. Усовершенствование разрядных цепей генераторов больших импульсных токов с учетом критериев их надежности: Дис. ... канд. техн. наук: 05.09.13. – Харьков, 2004. – 205 с. 6. Иыуду К.А. Оптимизация устройств автоматики по критерию надежности. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 194 с.

**УДК 556.53**

## **БЫСТРОВОЗВОДИМЫЕ ГИБКИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ТЕРРИТОРИЙ ОТ ЗАТОПЛЕНИЯ И ПОДТОПЛЕНИЯ**

**Волосухин В.А.**, докт. техн. наук, **Новиков С.Г.**, канд. техн. наук,

**Чижов А.Е.**, канд. техн. наук, **Чижов Е.А.**

(г. Новочеркасск, г. Курск, Россия)

*Quickly erected flexible hydraulic engineering constructions for protection of territories against flooding and flooding.*

В течение XX века от наводнений погибло более 9 млн. человек. Начало нового века также ознаменовано подобными природными катаклизмами, повлекшие многочисленные человеческие жертвы и приведшие к огромному материальному ущербу. Поэтому во многих странах мира осуществляются значительные капитальные вложения для защиты от затопления и подтопления.

Наиболее часто применяются защитные сооружения, содержащие напорные дамбы или стенки из строительного материала, которые устанавливаются на пути возможного направления движения воды и ветра.

История строительства земляных дамб для защиты территорий от затопления насчитывает более 8 тыс. лет. Дамбы обвалования в низовьях рек, как правило, несложные сооружения высотой 2-6 м из местного грунта. Они возводятся с соблюдением рекомендаций, относящихся к земляным плотинам (СНиП 2.06.04-82).

Недостатками земляных сооружений являются: значительная стоимость; меняется рельеф местности, что отрицательно сказывается на хозяйственной деятельности; частичное разрушение от стихийного действия; большая длительность возведения.

Учитывая то, что стихийные бедствия являются быстропотекающими во времени событиями, актуальна проблема совершенствования временных гидротехнических сооружений сравнительно невысокой стоимости, быстровозводимых, малой массы, отличающихся возможностью многократной установки в различных расчетных створах при минимальных затратах[1].

Развитие химии, текстильной промышленности и строительной индустрии второй половины XX века позволяет предложить быстровозводимые гибкие дамбы, которые могут быть использованы для ликвидации ЧС на период устройства основных защитных сооружений.

Анализ работ отечественных и зарубежных фирм показывает, что преимущественно в водохозяйственном строительстве используются ткани на синтетическом текстиле - капроновые, полиамидные, вискозные, акрилонитрильные и др. с водонепроницаемыми резиновыми и полимерными покрытиями.

По химической классификации компоненты таких материалов высокомолекулярные полимеры различных групп, поэтому далее отметим некоторые отличительные свойства полимеров, влияющие на проведение и результаты механических испытаний.

Общая теория механических свойств полимеров к настоящему времени разработана недостаточно полно, что обусловлено сравнительно недавним распространением и не традиционностью свойств этого типа материалов.

Экспериментальные данные показывают, что при значительных деформациях и быстром увеличении напряжений упругость полимеров не описывается законом Гука, а текучесть – законом Ньютона, графики зависимости деформаций от напря-

жений нелинейно варьируются от скорости деформирования[2].

Механизм разрушения полимерных и поликристаллических материалов в общих чертах аналогичен и сводится к разрыву межмолекулярных связей. Но для полимеров особенно заметно проявляется различие статической и динамической прочности, так как нарушение сплошности материала (разрыв) происходит не только при достижении некоторого предельного значения напряжений, но зависит (чаще нелинейно) от времени действия нагрузки.

В среднем диапазоне температур при невысоких скоростях деформирования разрыву полимеров обычно предшествуют значительные деформации.

В практических условиях эксплуатации большинство полимеров, входящих в состав резиново-тканевых и пленочных материалов, находятся в высокопластичном состоянии и даже за незначительные промежутки времени заметно проявляют релаксацию напряжений (снижение усилий при постоянной величине деформации), релаксацию деформаций или ползучесть (увеличение деформаций при постоянной нагрузке) и внутреннее трение (необратимые потери механической энергии) – при циклических нагружениях.

Созданные в разное время механические и энергетические модели поведения полимеров в процессе деформирования остаются весьма условными и способны отражать лишь качественное течение процессов.

Сортамент серийно выпускаемых прорезиновых тканей, обладающих различными физико-механическими, химическими и специальными свойствами достаточно велик – более 100 типов, но для нужд водохозяйственного строительства предназначено лишь несколько из них[3].

На основе проведенных анализов и расчетов нами подобран композиционный материал, разработаны конструкция сооружения и технология, по которой ООО «Рассвет-К» в г. Лиски Воронежской области изготовлена впервые в России гибкая быстровозводимая дамба, выполненная в виде замкнутой цилиндрической оболочки с длиной секции  $l=30$  м периметром  $L=15$  м. Секции могут соединяться в цепь сколь угодно большой длины.

Разработанное гидротехническое сооружение может быть использовано для защиты объектов в береговой зоне от стихийных бедствий, связанных с подъемом воды или волновыми нагрузками, например, при паводках на реках или катаклизмах в море, а также для возведения временной преграды на дне водоема при очистке от отложений гидроканалов или при их ремонте, или же для мелиоративного строительства при возведении водоподпорных плотин.

На рисунке показаны натурные испытания в г.Крымске Краснодарского края изготовленной гибкой дамбы, перекрывающей гидроканал при его ремонте.

Защитное гидротехническое сооружение действует следующим образом.

Для возведения дамбы на берегу, в месте ожидаемого подъема воды разматывают из рулона замкнутую цилиндрическую оболочку, в которую начинают закачивать воду из водного источника насосами, работающими параллельно. Насосы устанавливают для закачки воды таким образом, чтобы время закачки было соизмеримо с временем подхода стихийного бедствия. Число насосов зависит от сечения гибкой оболочки и ее длины в секции. Подача воды может быть осуществлена путем переключения городской магистрали на заполнение оболочки, возможен комбинированный вариант, чтобы уложиться в отпущенное время. Высота дамбы достигает высо-

ты 5 м и более с сохранением устойчивости конструкции. Чтобы не произошло разрушение гибкой оболочки колющим и режущим мусором, который в избытке находится в паводковой воде, дамбу изготавливают из особо прочных материалов.

При возведении временной преграды на дне водоема сооружение размещают в русле канала, после чего воду насосами закачивают в гибкую оболочку до тех пор, пока дамба не приобретет эксплуатационные размеры. Возможно не закреплять оболочку на фундаментном основании, так как, благодаря своему весу, она при воздействии внешних нагрузок сохраняет устойчивое положение.



Полевые испытания гибкого защитного гидротехнического сооружения

После окончания работы оболочку освобождают от воды, сворачивают в рулон и транспортируют в новое место для возведения или хранения.

Проведенные испытания подтвердили работоспособность дамбы. Патентные исследования позволили предложить новые конструкции, имеющие меньший вес и гораздо сокращающие время на возведение и демонтаж сооружения.

**Литература:** 1. Волосухин В.А., Кузнецов В.А. Основы теории и методы расчета тканевых сооружений мелиоративных систем: Монография. - Новочеркасск, НГМА, 2001.-С.15-18. 2. Новиков С.Г. Разработка гибких мелиоративных трубопроводов из полимерных материалов для поверхностного полива: Дис.... канд. техн. наук: 06.01.02.-Новочеркасск, НИМИ, 1992.-226с. 3. Малышев Б.Н. Научное обоснование параметров быстровозводимых гибких дамб для защиты территорий от затопления и подтопления. - Новочеркасск, НГМА, 2003.-46с.

**КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОРГАНИЗАЦИИ  
САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ ИНЖЕНЕРНЫХ  
СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ**

**Журавлева Е.В.**, канд. техн. наук, **Студеникина Л.И.**

(г. Курск, Россия)

*Computer technologies in the organization of independent work of students of engineering specialities are considered.*

В настоящее время одной из задач современной высшей школы является задача подготовки конкурентоспособного специалиста. Конкурентоспособность специалиста-выпускника вуза может рассматриваться как интегральный показатель качества его подготовки. Математическое образование является одной из основ профессионального образования специалиста любого профиля и особенно технического.

Анализ показал, что соотношение между фундаментальной и специальной составляющими инженерного образования смещается в пользу специальной составляющей, хотя по имеющимся оценкам специальное образование устаревает каждые 8-10 лет, тогда как фундаментальное образование призвано служить инженеру всю жизнь. А математическая культура – фундамент профессиональной культуры технических вузов. К сожалению, за последние годы существенно уменьшился объем часов, выделяемых на математику. В частности, объем курса высшей математики в технических вузах уменьшился на 30%, а иногда и на 60% по нематематическим специальностям в классических университетах.

В связи с этим, усиливается значимость самостоятельной работы студента. Самостоятельная учебная работа по определению Г.М. Коджаспировой и А.Ю. Коджаспирова - «это такой вид учебной деятельности, при котором предполагается определенный уровень самостоятельности обучающегося во всех ее структурных компонентах – от постановки проблемы до осуществления контроля, самоконтроля и коррекции, с переходом от выполнения простейших видов работы к более сложным, носящим поисковый характер. Самостоятельная учебная работа – это средство формирования познавательных способностей обучающихся, их направленности на непрерывное самообразование» [1].

Бесспорно, компьютерным технологиям в процессе самоподготовки отводится одно из первых мест. Их преимущества, такие как наглядность, возможность использования комбинированных форм представления информации, графическое изображение, стереозвучание, анимация, обработка и хранение больших объемов информации, доступ к мировым информационным ресурсам становятся основой в этой работе.

Вуз может предоставить студентам следующий арсенал информационных технологий:

- компьютерные учебники, предназначенные для формирования новых знаний и навыков;
- диагностические или тестовые системы, предназначенные для оценивания и проверки знаний и умений;
- тренажеры и имитационные программы, представляющие тот или иной аспект реальности, отражающие его основные структурные и функциональные характеристики и предназначенные для формирования практических навыков;

- лабораторные комплексы, в основе которых лежат моделирующие программы, предоставляющие в распоряжение обучаемого возможности использования математической модели для исследования определенной реальности;
- базы данных и базы знаний по различным областям, обеспечивающим доступ к накопленным знаниям;
- прикладные и инструментальные программные средства, обеспечивающие выполнение конкретных учебных операций: обработку текстов, составление таблиц, редактирование графической информации и др.
- телекоммуникационные системы, реализующие электронную почту и позволяющие осуществлять выход в мировые коммуникационные сети;
- электронные библиотеки как распределенного, так и централизованного характера, позволяющие по-новому реализовать доступ учащихся к мировым информационным ресурсам [3].

Более эффективное использование всех предлагаемых средств происходит в том случае, если преподаватель поможет студенту грамотно организовать самостоятельную работу, начиная с первого курса. Первые два года обучения составляют фундаментальную подготовку. В течение этого периода на студента просто обрушивается огромный поток информации, которую надо суметь переработать. Отсутствие привычного школьного ежедневного контроля знаний, новые формы проведения занятий, ощущение постоянного дефицита времени для многих первокурсников приводят в итоге к плачевным результатам. Поэтому, требуется правильная организация рабочего дня, на самостоятельную работу должно уходить не менее трех часов ежедневно.

Методическое сопровождение самостоятельной деятельности во многом будет зависеть от того, какие задачи будет ставить перед собой преподаватель, обеспечивая формирование компетентностного уровня профессиональной подготовки. Задачей преподавателя является развитие практической значимости изучаемого материала, создание студенту условий для реализации в ходе занятий основных идей, содержащихся в излагаемой теории, привитие навыков поиска нужной информации. Что касается поиска нужной информации, то здесь просто незаменимы современные компьютерные технологии. Опираясь на возможности сети Internet, студент может получить любой учебный материал как находящийся в базе данных вуза, так и из мировых баз данных.

Особое место в самостоятельной работе студента на первых курсах обучения занимает электронный учебник. Правильно подобранный компьютерный учебник поможет скорректировать знания студента, позволит изучать материал в индивидуальном темпе. Его назначение - предоставить большие возможности обучаемому по составу знаний, выработке навыков и организации индивидуального процесса обучения, а промежуточный контроль способствует оказанию своевременной помощи студенту в овладении знаниями, умениями, а также формирует у студентов ответственность, помогает анализировать личностные и профессиональные качества, собственную деятельность, развивает самостоятельность и творческое мышление.

На этом этапе включается в работу система тестирования. В частности, в КурскГТУ в этих целях используется программная оболочка АСТ (инструментальная среда адаптивного тестирования). АСТ подразумевает приспособление каче-

ственных характеристик тестовых заданий к поведению конкретного испытуемого. На практике это выглядит так: студент выполняет набор тестовых заданий соответствующего уровня. Если в процессе выполнения задания он отвечает на определенное количество вопросов неправильно, то уровень последующих заданий автоматически меняется на более низкий. При большинстве правильных ответов уровень сложности тестовых ситуаций повышается, меняется и оценка.

Компьютерная проверка знаний имеет следующие плюсы:

- устранение субъективизма в оценке знаний,
- оценивание результатов происходит мгновенно и может сохраняться на определенное время,
- возможность формирования большого количества вариантов теста;
- возможности редактирования тестов;
- удобные процедуры ввода и вывода информации,
- использование средств мультимедиа, позволяющих обеспечить быстрое и правильное восприятие содержания задания.

Самостоятельно проверить знания студент может в учебной лаборатории в удобное для себя время.

На последующих этапах обучения в институте при освоении специальных дисциплин самостоятельная работа студентов приобретает новые направления, так как приходится решать:

1. Учебные профессиональные задачи – задачи с профессиональной формулировкой, с элементами математического моделирования и известными математическими моделями и методами решения.
2. Учебно-исследовательские профессиональные задачи - задачи с профессиональной формулировкой, известной математической моделью и поиском математических методов решения.
3. Научно-исследовательские профессиональные задачи - задачи с профессиональной формулировкой и неизвестными математическими моделью и методами решений.

Все эти задачи помогают решать современные компьютерные обучающие системы для проведения учебно-исследовательских работ. Они реализуют моделирование как процессов, так и явлений.

Например, на кафедре высшей математики КГТУ успешно используется комплекс лабораторных работ по разделу курса «Статистические методы в инженерных исследованиях». Выполняя работы, студенты получают представление о методике построения математических моделей сложных технологических процессов, учатся строить матрицы планирования и проводить эксперимент в соответствии с ними, строить адекватные линейные и нелинейные модели, принимать решения после построения модели и движения в область оптимума [2]. Учебные планы таковы, что на проведение лабораторных работ отводится мало аудиторного времени. Поэтому студентам предоставляется возможность проводить данные лабораторные работы самостоятельно по индивидуальному графику.

Таким образом, самостоятельная работа студента в течение всего образовательного процесса в техническом вузе помогает в конечном итоге стать ему инженером, умеющим анализировать ситуацию, вырабатывать модель ситуации, производить исследования, объяснять происходящие процессы, прогнозировать изменения, де-

вать экономические оценки и обоснования, иметь четкое чувство ответственности за последствия своих профессиональных решений.

**Литература:** 1. Коджаспирова Г.М., Коджаспиров А.Ю. Педагогический словарь. - М.: Издательский центр «Академия», 2001. - 134 с. 2. Студеникина Л.И., Журавлева Е.В., Куценко В.Н. О тестовых и компьютерных технологиях в информатизации процессов обучения математике // Научные труды XI Международной российско-итальянской конференции. Том 2. – Москва, 2005. – С. 233-236. 3. Советов Б.Я., Цехановский В.В. Информационные технологии. – М.: Высш. шк., 2005.-173 с.

**УДК 37.0**

## **ПРЕПОДАВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН СТУДЕНТАМ ТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**Журавлева Е.В.**, канд. техн. наук, **Студеникина Л.И.** (г. Курск, Россия)

*Teaching of mathematical disciplines to students of technical specialities with use of computer technologies.*

Современный образовательный процесс характеризуется высокой интенсивностью, большим объемом сообщаемых знаний в единицу времени. Это заставляет рационально использовать отведенное время для изучения конкретной темы, повышать информативность сообщаемого материала, остро нацеливать практические занятия на формирование умений по изучаемой теме, не допуская неоправданного отвлечения на другие темы. Непрерывное развитие науки и техники, предъявление все более высоких требований к выпускнику вуза со стороны потенциальных работодателей способствует тому, что интенсивность процесса обучения будет расти и далее [1]. Процесс обучения в вузе предполагает гармоничное сочетание теоретических, практических, лабораторных занятий. Все они направлены на приобретение обучающимися необходимых знаний и соответствующих умений. Последнее, в немалой степени, если не в основном, относится к умению применять теоретические положения к решению практических задач, умению доводить «до числа» результаты теоретического анализа. Фундаментом для достижения практических результатов и накопления багажа умений служат знания математических методов решения и особенностей их применения, умение формализовать конкретную задачу. В последнее время к перечисленным составляющим следует добавить и умение применять современные компьютерные технологии для решения конкретных задач.

В связи с тем, что будущая профессиональная деятельность студента технических специальностей будет осуществляться в условиях широкого использования персональных компьютеров, расширяющейся сферы программных и аппаратных средств, то в процессе их подготовки необходимо использовать новые возможности педагогических технологий, в частности компьютерных, а так же необходимо иметь в виду, что главный принцип использования компьютера - это ориентация на те случаи, когда человек не может выполнить поставленную педагогическую задачу. Например, преподаватель не может наглядно продемонстрировать большинство физических процессов без компьютерного моделирования. С другой стороны, компьютер должен помогать развитию творческих способностей учащихся, способствовать обучению новым профессиональным навыкам и умениям, развитию логического мышления.

Применение компьютерных технологий в преподавании высшей математики исходит из соображений разумной достаточности и необходимости.

Уже на первых этапах обучения студентам предлагается использование электронных учебников. Это целесообразно при изучении тем, в которых нужна графическая интерпретация сущности задач и результатов решения, либо при изучении тем вынесенных на самостоятельную проработку Электронный учебник, сохраняя стержень логического и последовательного изложения материала дисциплины, содержит элементы хрестоматии, справочника, контрольные задания и оценочные тесты.

Опыт работы использования компьютерных технологий на кафедре высшей математики КурскГТУ показал, что, несмотря на изучение в школе и на первом курсе института информатики, довольно значительная часть студентов не обладает элементарными навыками работы на персональном компьютере. Поэтому необходимо первое занятие отводить на знакомство с интерфейсом программы, с которой предполагается дальнейшая работа. Наиболее часто используются программы MathCAD, MathLAB, Mathematica, Maple.

С первого семестра параллельно с практическими занятиями проводятся лабораторные работы по высшей математике. На них студенты учатся с помощью программы MathCAD производить операции над матрицами, решать системы линейных уравнений, строить графики функций, заданных в различных системах координат и т. д. Особое место отводится изучению теории вероятности и математической статистики. На эти разделы выделено совсем мало аудиторного времени, поэтому лабораторные работы по данной тематике просто не заменимы в изучении материала.

Полученные на первом курсе знания, навыки работы в MathCAD могут применяться далее, например, на занятиях по электротехнике, когда студентам предлагается некая схема, в определенных точках которой нужно найти токи и напряжения. Зная законы Кирхгофа, студент достаточно просто составляет систему линейных алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами. Такая система может содержать несколько уравнений. Владея методами решения таких систем, но, не используя компьютер, студент начинает обращать вручную комплексную матрицу. После весьма длительного периода простых алгебраических преобразований большого объема, решение, наконец, находится. При таком подходе подавляющее время тратится на большой объем элементарных преобразований, а вовсе не на электротехнические проблемы, связанные с исследуемой схемой. В этом варианте практических занятий нет времени на принципиально важный анализ влияния параметров схемы на величины токов и напряжений, поскольку для каждой вариации параметров необходимо решать задачу аналогичную первоначальной. В результате электротехника фактически подменяется элементарной, но весьма громоздкой алгеброй, а число и тип задач, с которыми сталкивается студент в период изучения дисциплины, становятся недостаточными. В то же время применение встроенных функций программы MathCAD позволяет моментально решить подобную задачу, как в символьном виде, так и в численной форме. Появляющиеся при этом резервы времени можно использовать для решения других задач анализа схемы. Преимущества применения систем компьютерной математики в этих случаях очевидны [1].

Начиная со второго курса, у студентов возникает необходимость практического применения полученных теоретических знаний для решения достаточно сложных

прикладных задач.

На кафедре высшей математики КГТУ успешно используется комплекс лабораторных работ по разделу курса «Статистические методы в инженерных исследованиях». В зависимости от выбранной специальности, студентам предлагаются конкретные индивидуальные задания, решение которых без применения современных программных компьютерных средств весьма трудоемки, а порой и невозможны.

Например, студентам, обучающимся по специальностям «Безопасность жизнедеятельности в техносфере» и «Защита окружающей среды» надо рассмотреть влияние на экологическую ситуацию деятельности крупной электростанции. В качестве факторов деятельности следует взять расстояние от электростанции, количество выпадающей пыли, интенсивность образования солей серной кислоты. В ходе выполнения задания студенты совершают переход от натуральных факторов к кодированным, составляют матрицу планирования и проводят эксперимент на виртуальной установке. Следующий этап работы - проверка значимости функции отклика, определение численных значений коэффициентов регрессии, проверяют их значимость, затем проверяют модель на адекватность. Помимо однофакторного эксперимента студенты осваивают многофакторный эксперимент, решают интерполяционные задачи, то есть задачи построения уравнения регрессии, адекватного результатам опытов, а так же задачи оптимизации.

Таким образом, разработанный лабораторный комплекс формирует у будущих инженеров навыки планирования эксперимента при поиске оптимальных условий.

Нельзя оставить в стороне контролирующую функцию компьютерных программных средств. В настоящее время это очень актуально, так как при использовании компьютерного тестирования существенно снижается нагрузка на преподавателя, уровень знаний, выявленный таким тестированием, как правило, совпадает с внутренним рейтингом в группе. Компьютерное тестирование целесообразно как элемент самоподготовки и проверки знаний базовых понятий изучаемой дисциплины, оно позволяет снять с преподавателя нагрузку по проверке начальных, элементарных знаний. Итоговый компьютерный контроль способен решить проблему обеспечения качества обучения. Задания для итогового контроля могут быть комплексными. Но на такой экзамен должен быть нацелен весь текущий процесс обучения. Задания для текущего контроля и самоконтроля должны быть в известной мере похожи на таковые для итогового контроля, студент должен знать, что его ожидает [2].

Педагогические программные средства вычислительной техники в целом ряде случаев позволяют обучающемуся работать в индивидуальном темпе, снимая при этом психологические барьеры общения. При этом учитывается начальный уровень подготовки, склад ума обучаемого, стиль мышления, особенности воспитания, памяти, внимания, темперамент, свойства нервной системы и т. д. Студент имеет возможность во время обучения обратиться за справкой, помощью или разъяснением, получает возможность прервать обучение и возобновить его с места прерывания с сохранением предыстории обучения. Это позволяет более эффективно уже с первых курсов использовать время обучающегося, организовать дополнительные занятия с отстающими и получить больший объем знаний успевающими.

Все это позволяет создать у студента математическое мышление, то есть способность к оперированию совокупностью математических, логически взаимосвязан-

ных понятий и суждений, различными структурами, знаковыми системами математического языка, а также способность к пространственным представлениям, запоминанию, систематизации и воображению.

Как следствие всего этого, студент приобретает посредством математики профессиональное мастерство инженера – комплекс качеств личности, знаний, умений, навыков, необходимых при анализе и решении профессиональных задач, возникающих в его практической деятельности.

**Литература:** 1.Ивановский Р.И. Практика применения систем Math CAD PRO. – М.: Высшая школа, 2003 - 430 с. 2. Итоги дискуссии «Эффективность внедрения новых информационных технологий в образование» – Модератор / подведение итогов: И.Н. Голицына доцент, Татарско-Американский институт, Казань, <http://ifets.ieee.org/russian/formad.html>.

## УДК 621.91.001.1

### **СОЦИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИ ПРОФЕССИОНАЛЬНО-ТРУДОВОЙ СОЦИАЛИЗИРОВАННОСТИ ЛИЧНОСТИ БУДУЩЕГО СПЕЦИАЛИСТА СРЕДНИХ СПЕЦИАЛЬНЫХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ**

**Смирнова Г.А.** (г. Курск, Россия)

*Sociological aspects of model of the professional - labour person of the future expert of average special institutions are formulated.*

Современное общество предъявляет непростые требования к личности специалиста: высокий образовательный уровень, гибкое мышление, профессиональная мобильность, умение вырабатывать собственную стратегию профессионально-трудовой деятельности [1, с. 16].

Многие современные исследователи (В.И. Байденко, И.А. Зимняя, Н.В. Кузьмина, А.В. Хуторский, В.Д. Шадриков и др.) [2, 3, 4, 5, 6] отмечают глобальные изменения в направленности образовательного процесса, анализируя его цели и содержание. На сегодняшний день происходят заметные изменения не только в экономике, но и во всех областях науки и техники. Это связано в первую очередь с возрастанием роли знаний, умений и навыков, необходимых для становления личности будущих специалистов. Новый взгляд на развитие образовательного процесса как фактора профессионально-трудовой социализации диктует современные требования к квалифицированным специалистам. Ими являются:

- умение трансформировать приобретаемые знания в инновационные технологии;
- владеть современными информационными технологиями и уметь пользоваться глобальными источниками получения информации;
- иметь мотивацию к продолжению обучения в течение всей жизни, обладать навыками самостоятельного получения знаний и повышения квалификации;
- знать и уметь применять методы научных исследований;
- обладать коммуникативными способностями, уметь работать в команде, адаптироваться к переменам, способствовать социальной сплоченности;
- разделять ценности необходимые для того, чтобы жить в условиях демократического общества, быть его гражданином [6, с. 28].

Все эти требования необходимы для успешной профессионально-трудовой социализации личности будущих специалистов. Поэтому для подготовки будущих специалистов, соответствующих современному уровню требований, основой содержания среднего профессионального образования наряду с образовательным процес-

сом должна стать модель профессионально-трудовой социализированности личности будущего специалиста.

Характеризуя модель будущего специалиста, Г.Б. Скок считает, что она является «конечным результатом образования», включая в себя и профессиональную подготовку, и такие личные качества, как физическое, психическое и нравственное здоровье, образованность и общекультурную грамотность [7, с. 27]. На наш взгляд, это можно сказать и о модели профессионально-трудовой социализированности личности будущего специалиста. Мы также разделяем мнение К.Г. Батоцыреновой, которая считает, что модель будущего специалиста помимо квалификационных требований, содержащихся в Государственных образовательных стандартах, содержит следующие характеристики:

- интеллектуальную компетентность, под которой понимается особый тип организации знаний – структурированность, категориальность и обобщенность, гибкость и оперативность в анализе ситуаций, что обеспечивает возможность принятия эффективных решений в определенной сфере деятельности;
- интеллектуальную инициативу – свойство личности представляющее собой органическое единство познавательных и мотивационных устремлений, готовность выйти за пределы заданного и развить не стимулируемую извне интеллектуальную деятельность;
- самоорганизацию, которая предполагает анализ ситуации, постановку задачи, планирование и прогнозирование возможных результатов и последствий собственных действий, самоконтроль и оценку эффективности своих решений на основе саморефлексии;
- саморегуляцию, означающую умение свободно управлять собственной интеллектуальной деятельностью, способность фиксировать изменения в себе, понимание и использование механизмов культурной самокоррекции [8, с. 150-151].

Данные характеристики – незаменимое дополнение к модели профессионально-трудовой социализированности личности будущего специалиста, но, не смотря на это, ее самым сложным и противоречивым составляющим является личностная характеристика, так как она зависит от специфики выбранной профессии. Любая профессионально-трудовая деятельность накладывает особенности на модель профессионально-трудовой социализированности личности будущего специалиста и как, следствие, на основные черты человеческого характера, поэтому в некоторых случаях при утверждении кандидатуры на ту или работу «оговариваются состояние здоровья, коммуникабельность, уравновешенность, устойчивость к стрессам и другие профессионально важные качества личности» [9, с. 22].

Таким образом, с точки зрения личностной характеристики модель профессионально-трудовой социализированности личности будущего специалиста предполагает «раскрытие возможностей человека, формирование его мотивов и интересов, воспитание потребностей в процессе целенаправленного взаимодействия преподавателя и студента» [10, с.43].

На сегодняшний день известно много подходов к разработке современных моделей будущих специалистов [8, 11, 12 и др.] Основываясь на традиционных подходах, качество профессиональной подготовки будущих специалистов всех профилей зависит от степени обоснованности целей и содержания образования, а так же принципов организации образовательного процесса средних специальных учебных заве-

дений. В данном аспекте модель профессионально-трудовой социализированности личности будущих специалистов основывается на «системе типовых задач или системе адекватных им умений» [12, с. 9], в состав которых входят задачи, обусловленные:

- особенностями научно-технического прогресса;
- особенностями общественно-политического строя страны;
- требованиями профессии.

Благодаря каркасу выбранных задач можно отметить, что первой и основной составляющей частью модели профессионально-трудовой социализированности личности будущего специалиста являются знания, умения и навыки, приобретаемые в процессе образования. Научно-технический процесс не стоит на месте, поэтому знания, умения и навыки необходимо приобретать представителям всех специальностей. Только выполняя это требование, современный специалист может быть востребованным на рынке труда. А для достижения этой цели он должен, прежде всего, уметь учиться, самостоятельно получать необходимые знания и находить общий язык с людьми, работающими рядом.

На вторую немало важную часть модели профессионально-трудовой социализированности личности будущего специалиста влияет окружающее общество со своими особенностями и образом жизни людей, проживающих в нем. Данное окружение формирует современные взгляды, научное мировоззрение и общую культуру будущих специалистов. И оттого, что на сегодняшний день актуально для учащихся, какие идеалы влияют на становление их личности, зависит будущее всей страны и каждого специалиста в отдельности.

Завершает представление о модели профессионально-трудовой социализированности личности будущего специалиста третья часть, которая объединяет три группы умений, необходимых будущему специалисту в его профессионально-трудовой деятельности:

- умения, позволяющие вести исследовательскую работу;
- умения, необходимых специалисту для решения практических задач;
- умения, обеспечивающие готовность к решению коммуникативных проблем [12].

На основании проведенного анализа моделей будущих специалистов можно сделать вывод о том, что первостепенной целью среднего профессионального образования является создание условий для профессионально-трудовой социализированности личности будущего специалиста. При реализации поставленной цели в образовательном процессе средних профессиональных учебных заведений цикл теоретического обучения должен строиться на приоритетах, отвечающих современным требованиям, с одной стороны, а с другой - должен быть тесно связан циклом практического обучения.

**Литература:** 1. Коротких О.А., Даринская Г.Р. Формирование профессиональной культуры специалиста // Специалист. – 2004, №4. – 16 с. 2. Байденко В.И., Джерри ван Зантворт Модернизация профессионального образования: современный этап. – М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2002. – 673 с. 3. Зимняя И.А. Педагогическая психология: Учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. – М.: Издательская корпорация «Логос», 1999. – 384 с. 4. Кузьмина Н.В. Акмеологическая теория повышения качества подготовки специалистов образования. – М., 2001. – 144 с. 5. Хуторский А.В. Ключевые компетенции как компонент личностно-ориентированной парадигмы образования // Народное образование. – 2003, №2. – с. 58- 65. 6. Шадриков В.Д. Новая модель специалиста: инновационная подготовка и компетентностный подход // Высшее образование сегодня. – 2004, №8 – с. 26- 31. 7. Скок Г.Б. К проблеме качества обра-

зования // Качество образования: концепции, проблемы оценки, управление. – Ч.1. – Тезисы Всероссийской научно-метод. конференции. – Новосибирск, 2000. – с. 20-28. 8. Батоцыренова К.Г. Новые информационные технологии как условие интеллектуального развития личности // Качество образования: концепции, проблемы оценки, управление. – Ч.1. – Тезисы Всероссийской научно-метод. конференции. – Новосибирск, 1998. – с. 150-155. 9. Мельничук О., Яковлева А. Модель специалиста (К вопросу о гуманизации образования) // Высшее образование в России. – 2000, №5 – с. 19- 25. 10. Петрунева Р.Н., Дулина Н.М., Токарев В.Н. О главной цели образования // Высшее образование в России. – 1998, №3 – с. 40- 46. 11. Проблемы методологии и методика исследования профессионального обучения в профтехучилищах. / Под ред. А.П. Беляевой – М.: Высшая школа, 1991. – 160 с. 12. Талызина Н.Ф., Печенюк Г.Н., Хихловский Л.Б. Пути разработки профиля специалиста // Под ред. Н.Ф. Талызиной. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1987 – 176 с.

**УДК 621.315**

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ИЗОЛИРОВАННЫХ ЖИЛ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ**

**Бузько С.В., Золотарев В.В., Карпушенко В.П., канд. экон. наук,  
Науменко А.А., канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)**

*The connection of the proportionality factor between speed, carry current of moving insulated sector-shape conductor and it's technological parameters at dry testing by electric current in modern technological extrusion lines.*

Испытания электрическим напряжением изолированных жил силовых кабелей в технологических экструзионных линиях после наложения изоляционного слоя является неперенным условием их поточного контроля. Характерной особенностью такого контроля, полученных волочением или прессованием жил, является их движение через область ионизированного газа, который выполняет роль внешней обкладки испытательного конденсатора.

В [1] были рассмотрены физические процессы для этого случая и установлена зависимость между током переноса и скоростью движущейся через область ионизированного газа круглой изолированной токопроводящей жилы.

Целью настоящей работы является рассмотрение более общего случая и установление зависимости между током переноса и скоростью движения через область ионизированного газа изолированной токопроводящей жилы секторного поперечного сечения. В случае секторной жилы ток переноса  $i_{II}$ , помимо всего прочего, будет связан со скоростью движения жилы  $V$  коэффициентом  $K(II)$ , зависящим от формы периметра  $II$  ее поперечного сечения

$$i_n = \varepsilon_0 \varepsilon_g PK(II)V, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0$  - диэлектрическая постоянная вакуума;  $\varepsilon_g$  - относительная диэлектрическая проницаемость изоляционного диэлектрического слоя, нанесенного на металлическую поверхность токопроводящей жилы.

Можно показать, что в случае фасонного поперечного сечения токопроводящей жилы, движущейся через область ионизированного газа при сухих её испытаниях выражение для коэффициента  $K(II)$  можно записать так

$$K(II) = 1 - \frac{E_0}{\varepsilon_0 f(II)} \quad (2)$$

где  $E_0$  - пробивная напряженность воздуха.

Функция  $f(\Pi)$  для рассматриваемого случая имеет интегральный вид

$$f(\Pi) = \frac{1}{\Pi} \oint_{\Pi} E_g dl \quad (3)$$

где  $E_g$  - напряженность электрического поля на границе «диэлектрический изоляционный слой – ионизированный газ» со стороны диэлектрика.

Если принять, что при малой толщине изоляционного слоя  $\delta$  поле в окрестности боковых и центрального ребер сектора такое же, как и поле цилиндрического конденсатора, а поле на плоском участке поперечного сечения жилы аналогично полю плоского бесконечного конденсатора, то напряжённость  $E_g(M)$  можно записать в виде

$$E_g(M) = \begin{cases} \frac{U_0}{(r_2 + \delta) \ln\left(\frac{r_2 + \delta}{r_2}\right)} \text{ если } M \in l_{12} \\ \frac{U_0}{\delta} \text{ если } M \in l_{23} \\ \frac{U_0}{(r_1 + \delta) \ln\left(\frac{r_1 + \delta}{r_1}\right)} \text{ если } M \in l_{34} \\ \frac{U_0}{(R + \delta) \ln\left(\frac{R + \delta}{R}\right)} \text{ если } M \in l_{45} \end{cases}, \quad (4)$$

где  $M$  - точка на границе раздела сред «диэлектрический изолирующий слой – ионизированный воздух».

Длину периметра  $\Pi$  можно выразить через длины отдельных участков (рис. 1) для жилы секторного профиля

$$\Pi = (l_{12} + l_{23} + l_{34} + l_{45}), \quad (5)$$

где  $l_{12}$  - половинная длина периметра центрального ребра по изоляции;  $l_{23}$  - длина прямолинейного участка секторного профиля;  $l_{34}$  - длина периметра бокового ребра сектора по изоляции;  $l_{45}$  - длина периметра, образованного большим радиусом секторного профиля.

Длины отдельных участков выражаются через технологические параметры изолированной токопроводящей жилы так:

$$l_{12} = \left(\frac{\pi}{2} - \beta\right)(r_2 + \delta), \quad (6)$$

$$l_{23} = (R - \delta - r_1) \cos(\beta - \gamma) - (r_2 + \delta) \operatorname{tg} \beta, \quad (7)$$

$$l_{34} = \left(\frac{\pi}{2} + \beta - \gamma\right)(r_1 + \delta), \quad (8)$$

$$l_{45} = \gamma(R + \delta), \quad (9)$$

где  $r_2$  радиус внутреннего ребра сектора по изоляции;  $\delta$  - толщина слоя изоляции;  $\beta$  - основной угол секторной жилы;  $R$  - большой радиус сектора по изоляции;

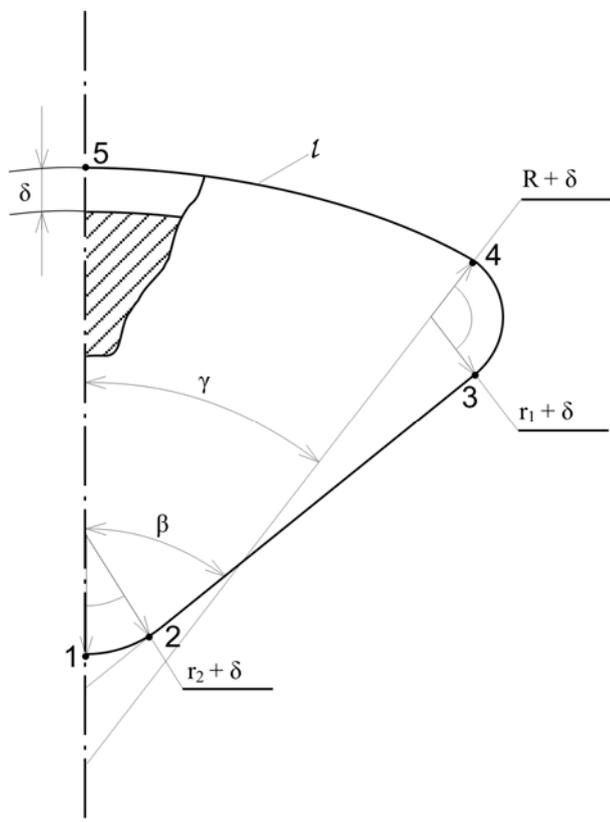


Рис. 1. Схема разбиения периметра изолированного секторной токопроводящей жилы при приближённом вычислении контурного интеграла (3).

$r_1$  - радиус бокового ребра сектора по изоляции;  $\gamma$  - вспомогательный угол сектора.

Учитывая теперь, что на выделенных участках секторной токопроводящей жилы  $E_g$  в соответствии с (4) имеет постоянные значения, выражение для коэффициента  $K(\Pi)$  можно записать приближённо, заменив интеграл суммой в (3)

$$K(\Pi) = 1 - \frac{E_0 \Pi}{\varepsilon_g (E_{12} l_{12} + E_{23} l_{23} + E_{34} l_{34} + E_{45} l_{45})}, \quad (10)$$

где  $E_{12}, \dots, E_{45}$  - значение напряженности  $E_g$  на соответствующих участках  $l_{12}, \dots, l_{45}$ .

Выражение (10) справедливо для секторных токопроводящих жил с произвольными основными технологическими параметрами.

Выводы.

1. Коэффициент пропорциональности между током переноса и скоростью движущейся при сухих испытаниях изо-

лированной токопроводящей жилы является интегральным параметром.

2. Для случая секторной токопроводящей жилы его можно выразить аналитически через основные технологические параметры секторной проводящей жилы, получаемой методом волочения или прессования.

**Литература:** 1. Науменко А.А., Золотарёв В.М., Карпушенко В.П., Золотарёв В.В. Физические процессы, приводящие к транспорту электрических зарядов слоем диэлектрика на проводящей подложке. – Вестник НТУ «ХПИ» – 2005, № 42. – С. 3-15.

УДК 621.315

## ОЦЕНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ ЖИЛЫ В ИОНИЗИРОВАННОМ ГАЗЕ

Золотарев В.М., канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)

*The physical processes and distribution of electric field's intensity on outer surface of insulated conductive sector threads which are placed in the ionized gas are analyzed.*

Согласно действующей нормативно-технической документации, после нанесения пластмассовой изоляции должны производиться испытания изоляции жил электрическим напряжением непосредственно в технологической экструзионной линии. Для того чтобы приложить электрическое напряжение к диэлектрическому слою, нанесенному на токопроводящую основу фасонного профиля, необходимо образовать испытательный конденсатор. Такой конденсатор легко образовать, например, при испытаниях готового кабеля электрическим напряжением. В этом

случае его обкладками являются металлические поверхности собственно токопроводящих жил, с одной стороны, а с другой – металлические поверхности экрана или оболочки так, что электрическое напряжение может быть приложено к любому участку диэлектрического слоя изоляции.

В случае сухих испытаний электрическим напряжением в технологической линии, имеется только одна обкладка испытательного конденсатора, а именно, - металлическая проводящая подложка, на которую нанесен слой диэлектрика. Трудность создания второй проводящей обкладки состоит в том, что жила движется в технологической линии и имеет фасонное поперечное сечение. Для того чтобы создать вторую, плотно облегающую слой диэлектрика с внешней стороны проводящую обкладку, используют ионизированный газ, которым является пробитый электрическим полем воздух при атмосферном давлении.

Физические механизмы, имеющие место при движении слоя диэлектрика на проводящей подложке через область ионизированного газа для случая круглой жилы были рассмотрены в [1], где установлено, что само движение диэлектрика вызывает ток переноса, который необходимо учитывать в расчетах параметров средств сухих испытаний. Для определения тока переноса необходимо знать распределение электрической напряженности по обе стороны границы «ионизированный воздух – диэлектрик».

**Целью настоящей работы** является установление распределения электрической напряженности на поверхности диэлектрического слоя, нанесенного на токопроводящую подложку, имеющую секторную форму поперечного сечения. Эта геометрия очень характерна для испытаний

многих разновидностей секторных токопроводящих жил с различными углами и радиусами секторов (рис. 1).

В ней изоляция (собственно диэлектрический слой) нанесен на металлическую подложку (волооченная или прессованная секторная жила из меди или алюминия) и имеет, как правило, небольшую толщину  $\delta$ . Искомым является распределение электрической напряженности на внешней границе диэлектрического слоя.

**Основные допущения.** Проводимость области ионизированного газа (воздуха) на несколько порядков выше проводимости изоляционного слоя. Эта область охватывает слой диэлектрика с внешней стороны, образуя первую цилиндрическую обкладку конденсатора (ее след на плоскости чертежа – Контур 1-2-3-4-5). Поэтому, данную обкладку можно считать идеально проводящей. Это допущение равноценно пренебрежению тангенциальной составляющей электрического поля на внешней

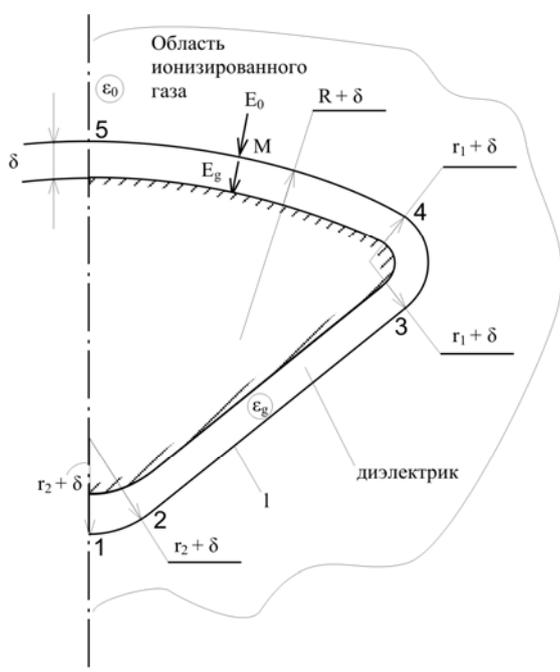


Рис. 1. Сечение секторной токопроводящей жилы, помещенной в область ионизированного газа:  $r_1$ ,  $r_2$  - радиус бокового и центрального ребра сектора, соответственно;  $\delta$  - толщина изоляции (толщина диэлектрического слоя);  $R$  - радиус сектора. В силу симметрии токопроводящей жилы на рисунке показана ее правая половина.

поверхности диэлектрика (т.е. на контуре 1-2-3-4-5), что вполне допустимо в силу очень большого соотношения полной напряженности электрического поля в области ионизированного воздуха  $E_0$  к тангенциальной составляющей  $E_\tau$  на внешней границе диэлектрика ( $E_0 / E_\tau \gg 1$ ) и невысокого значения диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_g$ .

Из принятого допущения  $E_\tau = 0$ , следует эквипотенциальность первой обкладки цилиндрического конденсатора. Вторую обкладку цилиндрического конденсатора образует внешняя поверхность токопроводящей жилы секторного профиля, на которую наложен слой диэлектрика толщиной  $\delta$ . В силу того, что проводимость материала токопроводящей жилы (медь, алюминий) также намного порядков больше проводимости слоя диэлектрика, вторую обкладку цилиндрического конденсатора тоже можно считать эквипотенциальной. По условиям безопасности токопроводящую жилу заземляют при сухих испытаниях напряжением на проход, а значит, потенциал второй цилиндрической обкладки можно принять равным нулю. Потенциал первой цилиндрической обкладки, при этом условии, очевидно, будет равен напряжению  $U_0$  источника питания, приложенному к высоковольтному испытательному электроду. По условиям испытаний между высоковольтным испытательным электродом и внешней поверхностью слоя диэлектрика должна образовываться область ионизированного газа, в которой напряженность электрического поля достигает пробивной величины  $E_0 \approx 30 \text{ кВ/см}$  для воздуха. Это достигается подбором значения  $U_0$  и формы испытательного электрода.

**Решение задачи.** Сделанные допущения позволяют свести задачу расчета поля в диэлектрике к решению двухмерного уравнения Лапласа [2]

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

для потенциала электростатического поля  $U$  при граничных условиях первого рода на обкладках конденсатора

$$\begin{aligned} U_1 &= U_0 \\ U_2 &= 0, \end{aligned}$$

где  $U_1, U_2$  - потенциалы первой и второй обкладок испытательного конденсатора, соответственно.

Для рассматриваемой цилиндрической геометрии уравнение (1) имеет вид [3]

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0, \quad (2)$$

где  $r, \varphi, z$  - цилиндрические координаты.

Учитывая, что толщина слоя диэлектрика  $\delta$  намного меньше характерного размера  $R$  поперечного сечения токопроводящей жилы можно записать уравнение (2) для характерных подобластей. Такими подобластями здесь являются: область, ограниченная участком 1-2 и радиусами  $r_2 + \delta$ ; область, ограниченная участком 3-4 и радиусами  $r_1 + \delta$ ; область, ограниченная участком 4-5 и радиусом  $R + \delta$ . Во всех этих подобластях распределение электрического поля близко к распределению поля между двумя коаксиальными цилиндрами, а уравнение (2) для этого случая суще-

ственно упрощается и приобретает вид

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{d}{dr} U \right) = 0. \quad (3)$$

Последнее уравнение является уже обыкновенным дифференциальным уравнением, а не уравнением в частных производных в силу того, что функция  $U$  зависит только от одной переменной  $r$ .

Решение такого уравнения при упомянутых выше граничных условиях имеет вид [4]

$$E_r = \frac{U_0}{r \ln \frac{R}{r_0}}, \quad (4)$$

где  $R$ ,  $r_0$  - радиус наружной и внутренней цилиндрических обкладок, соответственно.

В подобласти, ограниченной участком 2-3, радиусом  $r_2 + \delta$ , радиусом  $r_1 + \delta$  и прямолинейным участком токопроводящей жилы, электрическое поле в диэлектрике близко к полю бесконечного плоского конденсатора, а его напряжённость  $E$  является величиной постоянной [1]

$$E = U_0 / \delta. \quad (5)$$

Таким образом, в рассмотренной геометрии, когда диэлектрический тонкий слой нанесен на проводящую жилу секторного сечения, на границе раздела сред «идеальный диэлектрик – ионизированный газ» со стороны диэлектрика напряженность электрического поля  $E_g(M)$  равна

$$E_g(M) = \begin{cases} \frac{U_0}{(r_2 + \delta) \ln \left( \frac{r_2 + \delta}{r_2} \right)} \text{ если } M \in l_{12} \\ \frac{U_0}{\delta} \text{ если } M \in l_{23} \\ \frac{U_0}{(r_1 + \delta) \ln \frac{(r_1 + \delta)}{r_1}} \text{ если } M \in l_{34} \\ \frac{U_0}{(R + \delta) \ln \left( \frac{R + \delta}{R} \right)} \text{ если } M \in l_{45} \end{cases} \quad (6)$$

В силу высокой проводимости ионизированного газа по сравнению с проводимостью реальных диэлектриков, нормальная компонента  $E_{gn}(M)$  электрической напряженности в близкой окрестности этой границы со стороны диэлектрика практически равна полной напряженности  $E_g(M)$ . Со стороны ионизированного газа нормальная компонента электрического поля также практически равна полной напряженности  $E_0$  в силу принятых допущений.

Отсюда следует, что на рассматриваемой границе нормальная компонента индукции электрического поля будет испытывать скачок, численно равный [1]

$$\varepsilon_0 \varepsilon_g E_g(M) - \varepsilon_0 E_0 = \sigma(M), \quad (7)$$

где  $\sigma(M)$  - плотность поверхностного заряда на границе раздела сред «идеальный диэлектрик – ионизированный воздух».

Используя теперь полученное выражение (7) для поверхностной плотности заряда  $\sigma(M)$  можно вычислить ток переноса при движении изолированной жилы через область ионизированного газа, как это сделано в [1].

**Выводы:**

1. Определение напряженности электрического поля на внешней поверхности диэлектрического слоя для секторной изолированной токопроводящей жилы, помещенной в область ионизированного газа, можно свести к расчету поля коаксиальных цилиндров на участках, где находятся ребра сектора. На плоском участке секторной жилы электрическое поле, в данном приближении, можно рассматривать как поле плоского бесконечного конденсатора.

2. Напряженность электрического поля в окрестности границы «диэлектрик – ионизированный газ» со стороны диэлектрика  $E_g$  для ребер секторной изолированной токопроводящей жилы такая же, как и в модели двух коаксиальных цилиндров, а на плоском ее участке – такая же, как и в плоском бесконечного конденсаторе и определяется соотношениями (6).

3. С внешней стороны диэлектрического слоя изолированной секторной жилы в ионизированном воздухе напряженность электрического поля постоянная и равна пробивной напряженности  $E_0$  для воздуха при атмосферном давлении, что всегда имеет место при сухих испытаниях жил электрическим напряжением.

4. На внешней границе диэлектрического слоя имеет место скачок индукции электрического поля численно равный поверхностной плотности электрического заряда, определяемого условием (7).

**Литература:** 1. Науменко А.А., Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Золотарев В.В. Физические процессы, приводящие к транспорту электрических зарядов слоем диэлектрика на проводящей подложке. – Вестник НТУ «ХПИ», № 42, 2005. – С. 3-15. 2. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1976. – 616 с. 3. Борисенко А.И., Тарапов И.Е. Векторный анализ и начала тензорного исчисления. – Харьков: Изд-во Харьковского университета, 1972. – 253 с. 4. Ларина Э.Т. Силовые кабели и кабельные линии. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 365 с.

**УДК 339.138**

## **УЧЕТ ТИПА КРЕДИТНОЙ ПОЛИТИКИ ПРИ ВЫБОРЕ ФОРМЫ ОПЛАТЫ ЗА ПРОДУКЦИЮ**

**Мальцева А.А.** (г. Курск, Россия)

*The type of credit politics plays a great role in choice of the contracts conditions of sale of production. It allows to reduce the credit risk and to raise returns.*

Одним из ключевых аспектов управления оборотными средствами является проблема оптимизации дебиторской задолженности на предприятии. Эффективное управление дебиторской задолженностью позволяет снизить издержки по дополнительному привлечению заемных средств, обеспечивает рост финансовой устойчивости и платежеспособности предприятия.

Для повышения эффективности деятельности предприятия необходимым является сведение дебиторской задолженности до минимума. Это означало бы отказ от

продаж в кредит, что не возможно по следующим причинам:

- в рамках рыночной конкуренции предпочтение покупателя будет отдано тому предприятию, которое предоставит отсрочку платежа;
- «постоянные» клиенты предприятия часто нуждаются в предоставлении отсрочки в связи с временным отсутствием средств;
- оплата товаров, работ и услуг только за наличный расчет на предприятиях с большим оборотом может приводить к регулярно превышению лимита кассы, что скажется на эффективности работы бухгалтерии и др.

Исходя из этого, цель управления дебиторской задолженностью – оптимизация ее величины и структуры посредством финансово-экономического инструментария.

В настоящее время решение о предоставлении отсрочки платежа обычно принимается руководителем, которое зачастую основывается на интуиции и личных предпочтениях.

Таким образом, отказ от продаж в кредит существенно может сократить выручку предприятия, что негативно скажется на величине прибыли, снизит текущую платежеспособность.

Важным аспектом исследования процессов управления дебиторской задолженностью на предприятиях явилось создание инфологической модели, в рамках которой предлагается осуществлять выбор отсрочки платежа на основании рейтинговой оценки контрактов.

Для оценки рейтинга контракта предложены следующие критерии:

- вид и объем реализуемой продукции (критерий «продукция» - А);
- значимость и надежность покупателя (критерий «покупатель» - В);
- состояние дебиторской задолженности на предприятии (критерий «задолженность» - С).

Каждому критерию поставлена в соответствие система факторов, значение каждого фактора определяет система показателей. Численное значение каждого критерия (его ранг) получается как суперпозиция рангов факторов, каждый из которых представляет собой сумму произведений значений показателей на выбранные экспертным методом их удельные веса.

Результатом работы предлагаемой системы поддержки принятия управленческих решений является выбор наиболее целесообразной для данного случая формы оплаты за товары или услуги из следующих альтернатив: предоплаты ( $K_1$ ); оплаты за наличный расчет (отсрочка равна нулю) ( $K_2$ ); с отсрочкой не более 5 дней ( $K_3$ ); с отсрочкой не более 10 дней ( $K_4$ ); с отсрочкой не более 15 дней ( $K_5$ ); с отсрочкой не более 20 дней ( $K_6$ ); с отсрочкой не более 30 дней ( $K_7$ ); с отсрочкой более 30 дней ( $K_8$ ).

Использование модели применительно к конкретному предприятию должно учитывать также и тип кредитной политики, выбранный заранее на предстоящий финансовый год. В литературе выделяются следующие типы кредитной политики [1]:

- консервативный (или жесткий) тип, направленный на минимизацию кредитного риска;
- умеренный тип, ориентирующийся на средний уровень кредитного риска при продаже продукции с отсрочкой платежа;
- агрессивный (или мягкий) тип, который ставит приоритетной целью максимизацию дополнительной прибыли за счет расширения объема реализации продукции в кредит, не считаясь с высоким уровнем кредитного риска,

сопровождающим эти операции.

Для выбора оптимальной кредитной политики компания должна сравнить потенциальные выгоды от увеличения объема продаж со стоимостью дополнительного предоставления товарных кредитов и риском возможной неуплаты. Также важно учитывать потенциальную способность предприятия наращивать объемы производства, общую экономическую и политическую обстановку в стране, правовые условия обеспечения взыскания дебиторской задолженности [2].

В общем случае упомянутая инфологическая модель давала возможность определить выбор условия продаж для умеренного типа кредитной политики. Все критерии учитывались с одинаковой степенью значимости, что не может быть применимо для консервативной и агрессивной кредитной политики.

В случае консервативного типа кредитной политики наиболее важным критерием является критерий «задолженность», он имеет наибольший удельный вес. При весьма большом его значении предприятие ужесточает требования к дебиторам по своевременной оплате продукции, в основном отказываясь от продаж с отсрочкой платежа.

Вторым по значимости выступает фактор «покупатель», т.к. с целью минимизации риска неуплаты предприятию важно максимально обезопасить себя от ненадежных клиентов.

Менее значим в данном случае критерий «продукция». Полностью исключать его влияние нецелесообразно, т.к. даже в условиях консервативной кредитной политики необходимо стимулировать реализацию продукции, не пользующейся спросом, низко рентабельной или не надлежащего качества.

Для агрессивной кредитной политики ситуация со значимостью критериев прямо противоположная. Наиболее значим критерий «продукция», т.к. для предприятия в данном случае важно осуществить максимальное количество продаж, но естественно, стараться реализовывать с отсрочкой платежа только те виды продукции, которые нельзя, скажем, реализовать по предоплате.

Важным в данном случае является и выбор покупателя, хотя удельный вес этого критерия предлагается взять практически в половину меньшим, чем у критерия «продукция». Несмотря на то, что захват значительной доли рынка, лежащий в основе агрессивной кредитной политики, и предполагает принимать все условия клиента для максимизации объемов продаж, но выборочное отношение к покупателю все же необходимо. В противном случае предприятие может оказаться в ситуации не максимизированной, а минимизированной выручки в связи с недобросовестной оплатой долгов клиентами.

Наименее значим фактор «задолженность», т.к. его рост является закономерным в случае значительного увеличения объемов продаж. Однако его весьма большое значение может служить сигналом неэффективной кредитной политики по отношению к дебиторам, поэтому полностью исключать его влияние нельзя.

С учетом кредитной политики система поддержки принятия управленческих решений позволяет лицу, принимающему решения, предложить клиенту контракт с четко определенными сроками оплаты из множества  $\{K_1, K_2, \dots, K_8\}$ . Выбор типа контракта основывается на уровне значений показателей, рассчитываемых для конкретного случая, рассмотреть которые в рамках данной статьи не представляется возможным.

Таким образом, учет типа кредитной политики при работе с системой поддержки принятия управленческих решений по выбору условий контракта является определяющим фактором и позволяет учитывать стратегию конкретного предприятия, специфику его работы. Применение предлагаемой инфологической модели, реализованной с использованием современных средств информационных технологий, может заметно упростить работу специалистов отдела маркетинга промышленных предприятий с массовым и крупносерийным производством и являться основой для разработки программного комплекса «Автоматизированное рабочее место менеджера по продажам».

**Литература:** 1. Бланк И.А. Основы финансового менеджмента. – Т.1. – К.: Эльга, Ника-Центр, 2004. – 624 с. 2. Войко А.В. Управление дебиторской задолженностью : Дис. ... канд. экон. наук : 08.00.10 Москва, 2003.– 173 с.

**УДК 616.036**

## **СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СФЕРЕ РЕГИОНА**

**Соколова М.В.**, канд. техн. наук (г. Курск, Россия)

*The system of support of acceptance of administrative decisions in social - ecological sphere of region is offered.*

Постоянный физический, химический, информационный обмен в системе «человек - среда обитания» определяет доминирующее влияние окружающей среды на человека. Загрязненность воздушного и водного бассейна, состояние почв и другие экологические факторы являются причинами ряда заболеваний.

Известно, что все виды заболеваний можно разделить на два глобальных класса – экзогенные (вызванные влиянием внешних факторов) и эндогенные (вызванные внутренними причинами). К последним относятся врожденные пороки развития (ВПР). Показано, что уровень ВПР является показателем экологической напряженности региона. Поэтому актуальным является исследование влияния показателей загрязненности на заболеваемость населения, в частности, моделирование таких условий и соотношений параметров, при которых возможно снижение значения показателя ВПР.

С позиций системного подхода экологические и демографические системы относятся к сложным, следовательно, их моделирование затруднено вследствие того, что человечество еще не обладает исчерпывающей информацией о них. Применение традиционных методов многокритериальной оптимизации к изучению сложных природных систем не позволяет получить моделей, на основе которых можно реализовать достаточно адекватный прогноз.

Путем подбора коэффициентов, упомянутые методы создают модели различной сложности, имитирующие внутреннюю структуру процессов и модели функционального взаимодействия элементов системы. В таком случае при прогнозировании будут получены прогностические значения для моделей, а не для системы.

Альтернативой вышеуказанным методам являются методы искусственного интеллекта, при применении которых моделируется не сама система, а закономерности ее реакций на различные факторы, то есть ее поведение и механизмы его изменения. Как показано в ряде работ, в данном случае хорошо показали себя нейронные сети, которые являются «черным ящиком» и позволяют аппроксимировать ис-

следуемые процессы с высокой степенью адекватности. Область применения нейронных сетей – это анализ неустойчивых процессов, имеющих сложный рельеф функции ошибки, а также анализ сложных, трудно формализуемых систем [1. С.15].

В нашем исследовании планируется применить нейронные сети для построения моделей оценки влияния показателей загрязненности воздушного, водного бассейна и почв на заболеваемость населения. Предлагаемая технология проведения исследования подразумевает последовательное выполнение этапов в соответствии с рис. 1.

На первом этапе мониторинговая информация подвергается предварительной обработке, которая включает приведение к относительным единицам, нормирование, выделение обучающей, тестовой и контрольной выборок. На втором этапе осуществляется декомпозиция предметной области и формирование факторного пространства взаимосвязанных групп факторов. Для декомпозиции применяется метод главных компонент.



Рис. 1. Информационная технология для выработки управленческих решений.

На третьем этапе генерируются различные средства в виде нейронных сетей. Четвертый этап предполагает статистическое оценивание полученных моделей с целью выбора среди них наилучших, которые будут использоваться в дальнейшем для моделирования и прогнозирования региональных социальных и демографических показателей. На пятом этапе выбранные для каждого показателя нейронные сети объединяются в комитеты нейронных сетей, которые реализуют принцип коллективного принятия решений, предложенный Растргиным Л.А.

На заключительном шестом этапе производится оценка степени адекватности работы комитетов нейронных сетей путем проверки гипотезы принадлежности реальных значений динамики демографических показателей и их аппроксимантов одной генеральной совокупности путем расчета критериев Мостеллера, Тьюки, Манна-Уитни [2].

К настоящему построены модели для заболеваемости и смертности от основных классов заболеваний, а также для плотности населения, как одного из основных демографических показателей, который необходимо учитывать при организации систем поддержки-принятия решений в социально-экологической сфере.

Полученные нейросетевые модели были исследованы на степень их адекватности исследуемым процессам и на устойчивость к шуму. Эксперимент показал, что

созданные модели обеспечивают аппроксимацию со степенью адекватности на уровне не менее 0,95 и являются устойчивыми к гауссову шуму на уровне не более 25%.

Например, нейросетевая модель уровня плотности населения Курской области, описывается уравнением для соответствующего комитета нейронных сетей:

$$Y = 0,210 \cdot Y_1 + 0,385 \cdot Y_2 + 0,455 \cdot Y_3 \quad (1)$$

где  $Y_1$  - нейронная сеть, представляющая первую группу демографических показателей, имеет один скрытый слой, 3 нейрона во входном слое, 5 в скрытом и 1 в выходном:

$$Y_1 = \text{sigm}\left(\sum_{j=1}^5 (w_2 \cdot (\text{sigm}(\sum_{i=1}^3 (w_1 \cdot x_i - \theta_1)_i) - \theta_2)_j)\right) \quad (2)$$

где  $W$  – веса сети;  $X$  – входные сигналы сети;  $\Theta$  - пороговые уровни,

$$w_1 = \begin{bmatrix} -0,091 & -0,198 & -0,242 \\ 0,335 & 0,356 & 2,126 \\ 0,536 & 0,126 & 2,931 \\ 0,720 & 0,257 & 2,778 \\ 0,441 & 0,126 & 0,723 \end{bmatrix}, \quad w_2 = |0,191 \quad -0,430 \quad -0,656 \quad -0,629 \quad -0,057|, \quad \theta_1 = \begin{bmatrix} -0,056 \\ 0,466 \\ 0,684 \end{bmatrix}, \quad \theta_2 = 0,631,$$

$Y_2$  - нейронная сеть, представляющая вторую группу демографических показателей, имеет один скрытый слой, 3 нейрона во входном слое, 3 в скрытом и 1 в выходном:

$$Y_2 = \text{sigm}\left(\sum_{j=1}^3 (w_2 \cdot (\text{sigm}(\sum_{i=1}^3 (w_1 \cdot x_i - \theta_1)_i) - \theta_2)_j)\right), \quad (3)$$

$$\text{где } w_1 = \begin{bmatrix} 0,167 & -0,077 & 0,163 \\ -1,012 & 0,953 & -0,077 \\ -1,584 & 1,149 & 0,370 \end{bmatrix}, \quad w_2 = |0,129 \quad -0,648 \quad -1,071|, \quad \theta_1 = \begin{bmatrix} 0,268 \\ 0,034 \\ -0,114 \end{bmatrix}, \quad \theta_2 = 0,174$$

$Y_3$  - нейронная сеть, представляющая третью группу демографических показателей, представлена полифункциональной нейронной сетью с одним скрытым слоем, 4 нейронами во входном слое, 3 нейронами в каждом скрытом слое и 1 в выходном:

$$Y_3 = \frac{1}{3}(Y_{31} + Y_{32} + Y_{33}), \quad (4)$$

где  $Y_{31}$ ,  $Y_{32}$ ,  $Y_{33}$  – выходы скрытых слоев полифункциональной сети, которые выражаются как:

$$Y_{31} = \text{sigm}\left(\sum_{j=1}^3 w_2 \cdot (\text{sigm}(\sum_{i=1}^4 (w_1 \cdot x_i - \theta_1)_i) - \theta_2)_j\right), \quad (5)$$

$$\text{где } w_1 = \begin{bmatrix} -0,985 & -0,410 & 0,827 & 0,237 \\ -0,742 & 1,401 & -1,887 & -0,963 \\ -1,204 & -0,604 & 0,886 & 0,167 \end{bmatrix}, \quad w_2 = |-0,257 \quad -0,398 \quad -0,321|, \quad \theta_1 = \begin{bmatrix} -0,985 \\ -0,742 \\ -1,204 \end{bmatrix}, \quad \theta_2 = 0,328$$

$$Y_{32} = \text{th}\left(\sum_{j=1}^3 w_2 \cdot (\text{th}(\sum_{i=1}^4 (w_1 \cdot x_i - \theta_1)_i) - \theta_2)_j\right) \quad (6)$$

$$\text{где } w_1 = \begin{vmatrix} 0,411 & -2,423 & -1,017 & 1,426 \\ 1,697 & 0,731 & 2,045 & 0,292 \\ 1,266 & 0,910 & -1,305 & -0,373 \end{vmatrix}, \quad w_2 = \begin{vmatrix} -0,463 & 0,448 & 0,288 \end{vmatrix}, \quad \theta_1 = \begin{vmatrix} -1,425 \\ -0,199 \\ 0,039 \end{vmatrix}, \quad \theta_2 = 0,303$$

$$Y_{33} = \text{ssigm}\left(\sum_{j=1}^3 w_{2j} \cdot (\text{ssigm}\left(\sum_{i=1}^4 (w_{1i} \cdot x_i - \theta_{1i}) - \theta_{2j}\right)\right) \right) \quad (7)$$

$$\text{где } w_1 = \begin{vmatrix} 0,275 & -0,053 & -0,141 & 0,089 \\ 0,266 & -0,262 & 0,201 & 0,134 \\ 0,123 & -0,066 & -0,216 & 0,240 \end{vmatrix}, \quad w_2 = \begin{vmatrix} 0,063 & -0,026 & -0,121 \end{vmatrix}, \quad \theta_1 = \begin{vmatrix} 0,083 \\ -0,038 \\ 0,309 \end{vmatrix}, \quad \theta_2 = 0,262.$$

При настройке полифункциональной нейросетевой модели показателя в качестве функций активации для скрытых слоев применялись следующие:

$$1. \text{ Логистическая функция: } \text{sigm}(NET) = \frac{1}{1 + e^{-NET}}, \quad (8)$$

$$2. \text{ Гиперболический тангенс: } \text{th}(NET) = \frac{e^{NET} - e^{-NET}}{e^{NET} + e^{-NET}}, \quad (9)$$

$$3. \text{ Симметричная логистическая функция: } \text{ssigm}(NET) = \left(\frac{2}{1 + e^{-NET}}\right) - 1, \quad (10)$$

где  $W$  – матрица весов  $X$  – матрица входных сигналов  $\Theta$  – матрица пороговых уровней  $NET$  – матрица взвешенных входных сигналов.

Следующим этапом работы будет построение нейросетевых моделей для показателей загрязненности региона и для анализа ее влияния на показатели экзогенной и эндогенной заболеваемости.

**Литература:** 1. Haykin S. Neural Networks. A Comprehensive Foundation. - New York, NY: Macmillan, 1994. 2. Закс Л. Статистическое оценивание. Пер. с нем. В.Н.Варыгина. Под ред. Ю.П.Адлера, В.Г.Горского. М., «Статистика», 1976. 3. Sokolova Marina, Hudec Oto. Neural Networks for Economical Data Prediction // 6th International Scientific Conference «Applications of Mathematics and Statistics in Economy», Banska Bystrica, Slovakia, 2003, p.18-19.

**УДК 658. 562:338**

## **СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ВНЕДРЕНИЮ МЕХАНИЗМА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ**

**Мищенко А.Н.**, аспирант (г. Одесса, Украина)

*In work modern approaches to introduction of the mechanism of product quality control are considered.*

Располагая одной из самых больших территорий в Европе и достаточным количеством природных ресурсов, Украина, тем не менее не относится к числу богатых и успешных стран. Анализ опыта развития стран Европы и Азии, как свидетельствуют данные отечественной и зарубежной литературы, показывает, что изобилие природных ресурсов не является необходимым условием процветания. Богатство нации зависит от народа и правительства в большей степени, чем от природных ресурсов. Проблема заключается в хорошем управлении, так как задача управления сделать материальные ресурсы продуктивными и производительными [1].

В настоящее время начинается осознание стратегической роли качества для успеха предприятия и его экономической ценности для страны в целом. Подход к

управлению качеством определяется его основным назначением – удовлетворением запросов потребителя посредством непрерывного улучшения качества продукции и внутренних процессов деятельности предприятия.

Новая ориентация бизнеса на удовлетворение потребителя является основой развития движению за качество, набирающему силу во всех промышленно развитых странах. Присоединение (включение) Украины к этому движению позволит в перспективе войти в число стран, предприятия которых докажут свою способность поднять качество выпускаемой продукции до нового уровня, удовлетворяющего обязательным требованиям и потребительскому вкусу.

Целенаправленное внедрение стратегии управления качеством стало одним из главных видов многообразной деятельности предприятий.

Результативность работы в движении за качество подразумевает, с одной стороны, творческое освоение фундаментальных знаний, добытых пионерами движения за качество, с другой стороны, эффективность внедрения полученных сведений определяется специфическими чертами предприятия, масштабов и номенклатуры производимой продукции. Протяженность внедрения механизма управления качеством продукции может исчисляться годами, так как требует профессиональной и психологической перестройки руководства предприятием и созданием коллектива менеджеров, достаточно глубоко проникших во все сферы работы производства, отбор которых осуществляется с пониманием критериев, которые эти кандидатуры должны удовлетворять.

Разработка и внедрение системы управления качеством проводятся по типовому графику командой, назначаемой высшим руководством из представителей самого предприятия. Целесообразно начинать работу под методическим руководством внешнего консультанта, компетентность и опыт работы которого позволит как избежать авантюрных решений, так и уйти от шаблонов работы предприятий смежных отраслей.

Индивидуальный подход во внедрении механизма управлением качеством продукции, поиск нетривиальных решений на каждом отдельно взятом предприятии, условия работы которого никогда не повторяют какое-либо другое, является немаловажным вкладом в успешное решение поставленной задачи.

Опыт внедрения механизма управления качеством в других странах показывает необходимость создания на предприятии специализированной службы качества, основной деятельностью которой должно стать внедрение и применение на всех уровнях управления эффективных методов контроля и средств достижения целей в области качества [2].

Основными факторами, препятствующими успешному внедрению механизма управления качеством продукции на предприятиях являются общая обстановка в стране: отсутствие экономической и политической стабильности, незавершенность формирования свободного рынка и рыночных отношений, недостаточная насыщенность рынка товарами для обострения конкурентной борьбы за потребителя, отсутствие опыта работы в условиях развитых рыночных отношений, недостаточное применение научных методов анализа и методов статистического контроля.

Особое внимание необходимо уделить подготовке профессионалов в области управления производством – менеджеров. Навыки эффективного управления основываются не столько на инженерных, сколько на специальных знаниях и умении применять подходящие методы формирования, мобилизации и приведения в движе-

ние потенциала предприятия для решения стоящих перед ним задач. По оценкам всемирно известных специалистов в области менеджмента только 15% отклонений в качестве продукции зависят от работы как таковой, остальные 85% определяются недостатками в организации работы администрации [1].

Таким образом, вышеперечисленные положения позволяют сделать вывод о необходимости рационального сочетания вышеперечисленных основных и дополнительных факторов в реализации применения механизмов управления качеством на производстве.

**Литература:** 1. Титов П.И. Качество управления через управление качеством // Стандарты и качество. – 2003. – №5. 2. Иванов В.Н. Особенности и перспективы движения за качество // Стандарты и качество . – 2003. – №1.

## УДК 658.5

### ПРЕДПОСЫЛКИ ОЦЕНКИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ТЕХНИКИ ПО СТАДИЯМ ЕЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

**Тимофеев Д.В.**, канд. экон. наук (г. Харьков, Украина)

*Kinds and the basic parameters of competitiveness of technics on stades of her life cycle are considered.*

Конкурентоспособность (КС) продукции один из основных показателей уровня развития предприятия. В связи с этим в условиях рыночных отношений проблема управления КС занимает ведущее место в функционировании и стратегии деятельности, как крупных корпораций, так и небольших фирм. Причем актуальность решения этой проблемы тем весомей, чем выше уровень конкуренции на профильном рынке и соответственно выше темпы развития продукции данного назначения. Для сложной технической продукции, используемой в качестве орудий труда (автомобили, тракторы, металлообрабатывающее оборудование и др.), существенное влияние на КС оказывает также НТП, темпы которого возрастают и во многом тоже зависят от уровня конкуренции.

В этих условиях особенно возрастают требования к адекватности оценки КС с точки зрения ее динамики. Этим во многом определяется эффективность всей системы управления КС техники. С учетом этого можно констатировать, что ее КС проявляется в условиях весьма динамичной среды. Один и тот же товар в разных условиях будет обладать разным уровнем КС. Таким образом, рассматривая вопрос оценки КС техники, следует исходить, по нашему мнению, из следующих двух предпосылок. Во-первых, КС относительная характеристика товара и соответственно ее уровень может отражаться также относительным показателем. Во-вторых, относительный характер КС и динамичность среды, где она проявляется, обуславливает также динамичный характер КС, т.е. она является функцией времени. Следует отметить, что в существующих методах оценки КС превалирует статический подход, т.е. оценка ее осуществляется в определенный момент времени для сложившихся условий. Однако недоучет динамических аспектов КС существенно повышает вероятность принятия ошибочной неэффективной стратегии деятельности предприятия. В связи с этим возникает необходимость динамической оценки КС техники.

На динамику КС оказывают влияние субъективные и объективные факторы. Первые определяются, главным образом, квалифицированностью действий пред-

приятия по обеспечению КС. Объективные факторы имеют более долговременный характер. Они отражают влияние НТП, стоимости ресурсов, конъюнктуры рынка сбыта, действий конкурентов, налоговой и кредитно-финансовой политики государства и др. Одни из них имеют краткосрочный характер и при управлении КС требуют адекватных тактических действий. Другие объективные факторы имеют долгосрочный характер и влияют на динамику КС изделия в течение всего жизненного цикла техники ЖЦТ.

Процесс создания и освоения новой техники (СОНТ) является одним из наиболее важных в формировании ее КС. Процесс СОНТ по содержанию и назначению работ делится на два этапа. Первый этап – собственно создание новой техники (СНТ), второй – освоение производства новой техники. Этап СНТ включает в себя исследовательскую и конструкторскую стадии. Под этапом освоения производства подразумевается технологическая и организационная подготовки производства. Влияние СОНТ на КС носит долговременный характер и проявляется на всех стадиях ЖЦТ. Это обусловлено тем, что на этой стадии закладываются и формируются показатели качества создаваемой техники, уровень которых в значительной мере определяет КС. Кроме того, продолжительность СОНТ, обуславливающая во многом момент начала использования новой модели, влияет на КС как функцию времени.

Таким образом, исследуя КС техники за период ее ЖЦ как функцию времени, следует рассматривать различные объекты оценки. На стадии СНТ им является объект разработки. Соответственно можно оценивать КС этой разработки по отношению к возможным альтернативным проектам. На стадии производства изделия его оценка осуществляется как объекта производства и с этой точки зрения рассматривается его конкурентоспособность. Объектом анализа здесь является КС продукции предприятия. В период продажи продукции, последняя оценивается как объект реализации. При этом объектом анализа является КС товара. Наконец, на стадии эксплуатации техники она оценивается как объект применения (использования) потребителем. Объектом анализа в системе определения конкурентоспособности является в этом случае КС изделия. В совокупности перечисленные стадии составляют ЖЦ модели (наименования) техники, а объектом анализа в системе оценки КС является конкурентоспособность модели (КСМ). Рассматривая более широко этот вопрос, следует учитывать и другие признаки составляющих КСМ: место, время и условия проявления, целевую функцию, основной субъект оценки, факторы. В целом составляющие КСМ и их основные признаки приведены в табл. 1.

В свою очередь, показатели составляющих КСМ отражают их особенности по рассматриваемым стадиям жизненного цикла модели техники, а их уровень характеризует КС по сравнению с принятой базой. При этом между показателями КС для различных объектов существует иерархическая взаимосвязь в направлении развития процессов ЖЦ. То есть показатели объектов оценки на более ранних стадиях ЖЦ оказывают влияние (последствие) на показатели объектов оценки последующих стадий. Соответственно среди показателей КС отдельных объектов оценки по стадиям ЖЦ следует выделить две их группы. Первая группа – это показатели, непосредственно характеризующие особенности объекта. Эти показатели непосредственно характеризуют КС объекта с точки зрения предпочтений субъекта оценки, его возможностей, потенциала внешних и внутренних, объективных и субъективных факторов его функционирования.

## Основные признаки составляющих КС модели (наименования) техники

Составляющие КС модели техники	Место проявления	Время проявления	Условия проявления
КС разработки (КСР)	Сфера создания (разработки) продукции	Период разработки и экспериментирования	Конкуренция разработок
КС продукции (КСП)	Сфера пр-ва (предприятие-изготовитель)	Период пр-ва, ЖЦ пр-ва	Конкуренция объектов производства
КС товара (КСТ)	Сфера реализации, рынок сбыта	Период реализации, ЖЦ товара	Конкуренция товаров
КС изделия (КСИ)	Сфера применения, потребитель	Период использования	Конкуренция изделий (объектов использования)
Целевая функция	Основной субъект оценки	Объект оценки	Факторы
Предпочтение на стадии разработки модели	Разработчик и изготовитель	Объект разработки	Показатели и уровень КСР, КСП, КСТ, КСИ
Предпочтение в производстве	Изготовитель	Объект производства	Показатели и уровень КСП, КСТ, КСИ
Возможность большей реализации, пригодность к реализации	Покупатель	Объект реализации	Показатели и уровень КСТ, КСИ
Удовлетворение потребности с учетом затрат на ее удовлетворение	Потребитель	Объект применения, использования (потребления)	Показатели и уровень КСИ

Другая группа – опосредованные показатели, которые характеризуют объекты на последующих стадиях ЖЦ. Опосредованные показатели, в свою очередь, являются непосредственными для конкретных последующих стадий. В целом по объектам оценки КС непосредственные показатели приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Непосредственные показатели КС объектов оценки по стадиям ЖЦ техники

№ п/п	Составляющие КСМ	Непосредственные показатели объекта оценки
1	КС разработки	1.1. Степень (группа) сложности 1.2. Степень (группа) новизны 1.3. Вероятностные затраты на разработку 1.4. Вероятностная продолжительность разработки 1.5. Наличие необходимых ресурсов для осуществления разработки 1.6. Уровень риска реализации разработки
2	КС продукции	2.1. Затраты на производства 2.2. Уровень ресурсообеспечения производства 2.3. Технологичность (приспособленность к производственно-технологическим условиям изготовления) продукции 2.4. Затраты на освоение производства 2.5. Продолжительность освоения производства

3	КС товара	3.1. Затраты на реализацию 3.2. Затраты на рекламу 3.3. Транспортабельность товара 3.4. Сохраняемость в процессе складирования и хранения 3.5. Доля реализации товара на рынке (сегменте) конкурирующих товаров одного назначения 3.6. Уровень КС товара (по соотношению доли рынка данного товара и доли рынка товара с максимальным объемом реализации на данном рынке) 3.7. Уровень маркетинговой деятельности 3.8. Уровень конкуренции на рынке сбыта
4	КС изделия	4.1. Цена потребления 4.2. Уровень качества 4.3. Цена приобретения 4.4. Уровень сервисного обслуживания 4.5. Интегральный показатель конкурентоспособности

Проведенный анализ позволяет выделить совокупность факторов КС, оценки и ее динамики по определенным признакам. Это непосредственно обуславливает особенности и позволит повысить эффективность системы управления динамикой КС.

## УДК 338.45

### ІННОВАЦІЙНА МОДЕЛЬ РОЗВИТКУ ДЕРЖАВИ

Мартиненко В.Я., докт. техн. наук, Федішин Б.П., канд. екон. наук  
(м. Тернопіль, Україна)

*The article examines the necessity of the use of strategic model of innovative policy of Ukraine. Innovative development of economy and methodology of development of innovative model on the basis of the complex scientific-innovative having a special purpose programs which are developed on the base of priority directions of development of the state is offered.*

В багатьох державах створено сприятливе для появи інновацій внутрішнє і зовнішнє середовище: підтримуються усі види інновацій, нові організаційні структури, розробляються та реалізуються цільові програми інноваційного розвитку, формується сприятливе законодавче та податкове забезпечення, цільове державне фінансування. Результат такого сприяння – зростання наукомісткості ВВП. Для США, Японії, Німеччини видатки на НДДКР складають 2,5-2,9% від ВВП, у Франції, Великобританії – 2,2-2,4%, Італії і Канаді – 1,3-1,7%, в Україні – менше 1% (хоча законом передбачено 1,7% від ВВП). В Україні за останні 10 років частка держави у національних видатках на науку знизилась. З одного боку це зумовлено скороченням оборонних програм, з другого – прискоренням розвитку інноваційної сфери у приватному секторі.

У США активно формують інкубатори інновацій, в Японії створюють технопарки, технополіси – спеціальні містечка для вчених, в яких поєднуються фундаментальні дослідження із прикладними розробками. Так, в Японії проект TARA (Tsucuba Advanced Research Alliance) об'єднав у місті Цукуба найбільший у світі потенціал вчених, викладачів, студентів, дослідників. Тут сконцентровано близько 50 науково-дослідних центрів, 200 приватних дослідницьких лабораторій, 12 тисяч вчених та

інженерів. Загальний бюджет містечка становить майже \$3 млрд.[ 1 ] .

Метою статті є обґрунтування стратегії інноваційної політики держави, а також тенденції інноваційного розвитку України.

Інноваційна модель формується на концепції інноваційної політики. Вона повинна забезпечувати пріоритет інновацій, підвищувати інноваційну активність підприємств, зменшувати розрив в рівнях економічного та соціального розвитку регіонів. Формування в країні інноваційної моделі дає змогу бачення пріоритетів держави (конкретних показників інновацій з диференціацією по галузях та часу). В такому варіанті учасники інноваційного забезпечення, траєкторію досягнення цих віх вибирають самостійно на основі конкурентної боротьби. Інноваційна модель розвитку створюється з відповідними організаційними структурами зверху до низу, їх правовим статусом, достатнім фінансуванням та матеріально-технічним забезпеченням. Роль держави в моделі полягає у своєчасній зміні показників інноваційних потреб, координації робіт з розробки та впровадження інновацій, в стимулюванні їх та підтримці.

Інноваційна політика держави ґрунтується на певній інноваційній стратегії. Російські вчені В. Фрідлянов, Р. Некрасов, С. Остапюк виділяють три стратегічні моделі інноваційної політики [ 2 ] :

1. Модель стратегії “перенесення” полягає у використанні наявного зарубіжного науково-технічного потенціалу через закупівлю ліцензій та виготовлення продукції на їх основі з метою продажу на зарубіжних ринках.

2. Модель стратегії “нарощування” передбачає використання власного науково-технічного потенціалу, залучення іноземних вчених, об’єднання результатів фундаментальної та прикладної науки з метою створення нових продуктів та технологій для власних потреб.

3. Модель стратегії “запозичення” передбачає освоєння випуску наукомісткої продукції, яку виробляли раніше індустріально розвинені країни, на основі використання дешевої власної робочої сили та частини власного наукового потенціалу.

Держава в інноваційній моделі розвитку забезпечує функціонування тих галузей, підприємств, де господарювання на приватних принципах непривабливе, неефективне, або неможливе. Для розв’язання цих завдань використовують такий інструмент як державне інноваційне підприємництво.

В Україні інноваційна діяльність розвивалась на засадах командно-адміністративної економіки, характерними властивостями якої були:

- відсутність ендогенного чинника розвитку;
- незалежність фундаментальних та прикладних досліджень ;
- пріоритетний розвиток НДДКР в оборонній сфері за рахунок екзогенного чинника;
- неможливість використання технологій подвійного призначення в народно-господарському комплексі ;
- ігнорування такими інноваціями як інновація – організаційні форми та інновація – нові ринки збуту продукції;
- слабка дифузія впровадження інновацій.

В умовах ринкової трансформації економіки необхідно здійснити переорієнтацію інноваційної діяльності. Держава повинна виробити ясну стабільну інноваційну політику, розробити концепцію, побудувати інноваційну модель такого ро-

звітку. На нашу думку – це основні послідовні етапи, які можуть здійснюватися, уточнюються, але їх обійти неможливо.

Державна інноваційна політика може формуватися на основі розглянутих трьох моделей стратегій розвитку, запропонованих російськими вченими В. Фрідляновим, Р. Некрасовим, С. Остапоком: “перенесення”, “запозичення”, “нарощування”. Крім цього – повнішого використання науково-технічного потенціалу оборонного комплексу, його розвитку, об’єднання ринкових методів стимулювання із посиленням державного регулювання, створенням механізмів впровадження новітніх розробок у виробництво та комерційного клімату для розвитку фінансово-промислових груп, технопарків, технополісів, вільних економічних зон, інших ринкових інноваційних структур.

Стрижнем такої політики повинно стати правове забезпечення, в тому числі, законодавча фіксація частки (не менше 6%) національного доходу, яку спрямовують на інноваційну діяльність (в США – 10%).

Держава повинна інноваційну політику сформувати у концепцію інноваційного розвитку, в якій були би вказані пріоритетні галузі науки, народногосподарського комплексу та відповідного напрямку інноваційної діяльності, основні показники і терміни досягнення, обсяги фінансування та правове забезпечення.

Концепція розробляється Кабінетом Міністрів з участю міністерств, НАНУ, регіонів та затверджується Верховною Радою України. На основі концепції формується інноваційна модель. В ній:

- конкретизуються напрямки розвитку на основі пріоритетів;
- виробляються конкретні заходи із диференціацією по часу та по підприємствах, закладах, інституціональних формах ;
- формуються податкові стимули для фізичних та юридичних осіб;
- гарантується вченим-інноваторам належний соціальний захист: зарплата, пенсія, умови праці, житло;
- передбачається створення ринкових інноваційних структур (технопарків, технополісів, фінансово-промислових груп, вільних економічних зон, розвиток малих інноваційних структур);
- створюється система підготовки фахівців із інноваційної діяльності (патентно-повідомлених із захисту інтелектуальних прав, інноваційних менеджерів та маркетингологів);
- систематизується система доходів державного регулювання розробки та впровадження інновацій, так зване “м’яке” та “жорстке” регулювання;
- регламентується розвиток ВПК та використання його технологій в народному господарстві ;
- передбачається інноваційний розвиток державних галузей та територій;
- створюється система впроваджень нововведень та захисту довілля.

В умовах нестабільної економіки важливого значення набуває розвиток інноваційного підприємництва. Система підтримки такого підприємництва повинна охоплювати всі сфери, особливо побут, культуру, комунальне господарство. В інноваційній моделі для цих сфер на першому етапі повинно бути передбачено амортизаційні та податкові пільги, субсидії, субвенції, резервні фонди, податкові кредити.

В індустріально розвинених країнах (ІПК) застосовують інвестиційні податкові кредити. В США до 1986 року їх використали більше половини фірм, крім цього пі-

дприємства мали право вираховувати з податку на прибуток до 10% витрат на нове устаткування. В Японії промислові компанії зменшують податок на прибуток на суму, що дорівнює 7% інвестицій у нову техніку. У Канаді аналогічна знижка коливається від 7% до 20%. В Англії компаніям дозволено законом використовувати 10% корпоративного податку для обумовлених інвестицій.

В США застосовують спеціальні податкові стимули посилення співробітництва фірм з університетами. Фірмам надано право вираховувати із податку на прибуток 20% їхніх витрат на фінансування фундаментальних наукових досліджень в університетах. У Франції акціонерні товариства мають право на зниження суми податку у розмірі 50% збільшення суми витрат на НДДКР порівняно із попереднім роком. У Швеції фірми мають право вкладати до 50% прибутку в резервні фонди майбутніх інвестицій, які звільнені від оподаткування.

Враховуючи досвід розвитку ІРК, теоретичні напрацювання вчених, рахуємо за доцільне на базі інноваційної моделі розробити комплексні науково-інноваційні цільові програми. Програми розробляються поетапно з інтервалом 3-5 років. Вони конкретизують в детермінованому порядку завдання концепції, обсяги фінансування, організації розрахунків, сфери впровадження нововведень, правове податкове забезпечення, глибину державного регулювання. В них завдання розміщуються в ітеративній послідовності, мають конкретних виконавців, направлені на вирішення основної мети програми даного етапу. Обов'язково в програмі передбачається система контролю за виконанням завдань.

Дані програми базуються на загальнодержавних інтересах. Враховують потреби та можливості міністерств, відомств, регіонів, окремих компаній, наукових і навчальних закладів. В них передбачається створення нових інституціональних форм державного менеджменту, розвиток недержавного інноваційного сектору.

Роль регіонів:

- розробка регіональних інноваційних програм ;
- сприяння розвитку регіональних інноваційних структур ;
- бюджетне фінансування зацікавлених розробок програм ;
- розвиток наукоємких виробництв ;
- контроль за довкіллям, охороною праці ;
- маркетингова діяльність з поширення інноваційних пропозицій.

**Література:** 1. “Инновационная модель развития: теория и практика нововведений” – М.: Информпечать, ИТРК РСФСР. – 1998. – с. 8. 2. Фридлянов В., Некрасов Р., Остапюк С. Инновации как фактор экономического роста // Общество и экономика. – 1999.- №7-8- ст.115-116.

**УДК 332.146**

## **РЕГІОНАЛЬНА ІННОВАЦІЙНА ПОЛІТИКА В УМОВАХ СТРУКТУРНОЇ ПЕРЕБУДОВИ ЕКОНОМІКИ**

**Мартиненко В.Я.**, докт. техн. наук, **Федишин Б.П.**, канд. екон. наук,

**Стойко І.І.**, канд. техн. наук, **Дудкін П.Д.** (м. Тернопіль, Україна)

*Is reviewed the proposals for advancing a management system innovations by processes in locale with the purpose of raising the responsibility of regional state frames and intensification of social and economic development.*

**Вступ.** Світовий досвід свідчить про те, що розвиток економіки держави можливий лише на основі розвитку науки, впровадження її результатів у

виробництво. Виробництво товару є функцією декількох факторів, в тому числі інноваційного, про що констатує класична і неокласична теорії макроекономіки [1 – 3 та ін.]. А макроекономічна виробнича функція записується, як  $Y_t = Y_t(A, B, K, T)$ , де фактор технічного прогресу  $T$  є одним із основних параметрів економічного зростання. Створення належних умов для розвитку науки і, особливо, використання її досягнень в економіці – найважливіше завдання держави.

**Мета і постановка задачі.** В Україні кошти на науку виділяються в розмірі до 1% валового національного продукту, а на впровадження інновацій централізовано практично не виділялись. Враховуючи те, що у підприємств недостатньо фінансових ресурсів на заробітну плату, покупку матеріалів, сировини, комплектуючих, інноваційні процеси затухають, що поглиблює економічну кризу. Регіональні органи управління залишилися поза впливом на інноваційні процеси. Міністерства та комітети прямих своїх функцій щодо розвитку науково-технічного прогресу на підзвітних підприємствах, в умовах зміни власності останніми, теж не виконують. Поглиблює ситуацію відсутність реального попиту на науково-інноваційну продукцію. Пропозиція перевищує його в 6-10 разів. Падає престиж науково-технічної діяльності, йде відтік наукових кадрів. Метою статті є розгляд пропозицій для удосконалення системи управління інноваційними процесами в регіоні для підняття відповідальності регіональних державних структур і інтенсифікації соціально-економічного розвитку.

**Вирішення задачі.** В Тернопільській області [4; 5] є значний науковий потенціал: 4 державних та 5 недержавних вищих навчальних заклади III – IV рівня акредитації, 4 галузевих сільськогосподарського напрямку та стільки ж технічного напрямку наукових закладів. Загальний обсяг робіт, виконаних науковими організаціями (вартість за договірною ціною) склав за попередній рік 12,553 млн. грн., проти 4,3 за 1999 рік і збільшився на 17% по відношенню до 2004 року. Фінансування здійснювалось, в основному, за рахунок власних коштів (3,666 млн. грн.), коштів Держбюджету (4,49 млн. грн.), і, що характерно, 1,224 млн. грн. профінансовано організаціями підприємницького сектору. Доля коштів держбюджету становила лише 36%. Незадовільний фінансовий стан підприємств і організацій, відсутність дієвої підтримки наукової діяльності державою, регіональними органами влади (в бюджеті області відсутні кошти на підтримання інноваційної діяльності) негативно вплинуло на результати наукових розробок, які дозволили б одержати продукцію конкурентоспроможну на світовому ринку, підвищити наукоємкість і технічний рівень виробництва. Питома вага розробок по створенню і удосконаленню нових видів виробів, технологій, матеріалів, сортів рослин, методів і теорій становить 10%.

Найважливішими функціями регіонального розвитку інноваційних процесів можна визначити такі:

- створення координуючої структури по науково-інноваційному розвитку;
- проведення маркетингових досліджень по найактуальніших напрямках наукових розробок, інноваціях;
- прогнозування короткотермінового та перспективного розвитку як економіки, так і потреб для неї наукової продукції;
- формування регіонального замовлення на науково-інноваційну продукцію, підтвердження його реальними коштами із бюджету області;

- визначення пріоритетів розвитку економіки та інноваційної діяльності;
- наукове забезпечення соціально-економічного розвитку;
- інтелектуальне забезпечення.

При виробленні і реалізації регіональної інноваційної політики можна виділити три рівні: державний, галузевий і територіальний. Державний рівень включає Раду з питань науки і науково-технічної політики при президентові, Міністерство освіти і науки, Національну академію наук України.

Галузевий рівень включає міністерства – підприємства. Регіональний – раду по координації науково-технічної діяльності, що необхідно створити при голові облдержадміністрації (облвиконкомі), відділ наукового розвитку регіону, який необхідно створити при облвиконкомі, підприємства, організації. На регіональному рівні відсутні координуючі структури інноваційного розвитку районного рівня, недостатній потенціал на обласному рівні, оскільки управління освіти і науки ОДА галузевою наукою практично не займається.

На рівні середніх підприємств взагалі відсутні такі структури. В оборонному комплексі конструкторсько-технологічні бюро та науково-дослідні інститути відділились від заводів-виробників. Продукція підприємств залишилась без наукового супроводу, стає не конкурентоспроможною, а заводи – на грані банкрутства. Створення сучасних координуючих структур інноваційного розвитку на обласному рівні є нагальною потребою економіки. Необхідно поновити взаємозв'язки КБ та НДІ оборонного комплексу із підприємствами – товаровиробниками та на всіх підприємствах створити відділи, служби інноваційного розвитку.

Важливою функцією ринкової економіки є маркетингові дослідження, зокрема, в інноваційному напрямку. Проведення таких досліджень виявить інноваційні потреби, вільні ніші в економіці, на основі чого будуть розроблятися нові види продукції, технології.

На основі маркетингових досліджень буде робитися прогноз розвитку підприємств, здійснюватися їх перепрофілювання, а на регіональному рівні – розробка інноваційних програм, індикативних та директивних планів.

Ефективний розвиток регіону можливий на науково-інноваційній основі. Таку основу адміністрації областей, районів, міст можуть формувати, залучаючи наукові заклади до виконання конкретної теми по актуальній проблемі. Для цього у бюджетах відповідного рівня щорічно необхідно передбачати певні кошти.

В умовах структурної перебудови економічної системи, дефіциту коштів необхідно визначити пріоритетні напрямки розвитку регіональної економіки та під ці напрямки – пріоритети науково-інноваційної діяльності. Пріоритети повинні бути розраховані на певні терміни, етапи, контролюватись державою чи адміністрацією регіону і достатньо фінансуватись. Тільки при такому забезпеченні можливий інноваційний прорив.

Наукове забезпечення соціально-економічного розвитку регіону, перш за все, полягає у залученні наукового потенціалу до розробки щорічних програм соціального розвитку регіонів (областей, районів, міст). Такі програми повинні враховувати сировинні можливості, наявні потужності, інтелектуальні та інші ресурси. Оптимальне їх поєднання відводиться для науковців. Важливого значення набуває і розробка цільових комплексних програм як технічних, так і економічних.

Інтелектуальне забезпечення полягає в підготовці високопрофесійних кадрів через систему державних закладів нового покоління: академію державного управління при Президентові України, магістратури, аспірантури, докторантури. Важливими заходами загального всеобучу є проведення наукових конференцій, семінарів, забезпечення працівників науково-технічною та економічною інформацією через відповідні центри, тісна співпраця із зарубіжними науковими закладами, науковцями.

На регіональному рівні формування інноваційної політики повинно здійснюватись як через діючі структури в т.ч. вузи, галузеві наукові заклади, конструкторсько-технологічні бюро та інші, так і через структури нового типу:

- інноваційний та інвестиційний фонди,
- бізнес інкубатори,
- малі наукові підприємства,
- технопарки,
- технополіси,
- проблемно-орієнтовані об'єднання.

**Висновки.** Реалізація запропонованих пропозицій та досвіду сприятиме виробленню системи управління інноваційним процесом в регіоні, підніме відповідальність державних структур обласного та районного рівня, міськвиконкомів, підприємств всіх форм власності за впровадження інновацій. А це сприятиме інтенсивному соціально-економічному розвитку, покращенню життєвого рівня населення.

**Література:** 1. И. Геблер. Макроекономіка. – К.: УМК ВО. 1993. 2. Фатхутдинов Р.А. Конкурентоспособность организации в условиях кризиса: экономика, маркетинг, менеджмент. – М.: Издательско-книготорговый центр "Маркетинг", 2002. – 892 с. 3. Кардаш В.Я. Товарна інноваційна політика: Навч. пос. – К.: КНЕУ, 1999. – 124 с. 4. Організаційно-економічний механізм регіону: трансформаційні процеси та їх інституційне забезпечення: Монографія / Кол. авт.; За ред. д.е.н., проф. А.Ф.Мельник. – Тернопіль: Економічна думка, 2003. – 608 с. 5. Наукова та інноваційна діяльність в області за 2005 р. Статистичний бюлетень. – Тернопіль: Головне управління статистики у Тернопільській області, 2006. – 55 с.

## УДК 658.8

### МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ РЕАЛИЗАЦИИ НОВОЙ ТЕХНИКИ

**Тимофеев В.Н.**, докт. экон. наук (г. Харьков, Украина)

*The analysis of problems of forecasting and modelling of processes of selling of new technics for the period of life cycle is lead.*

При обосновании создания и освоения новой техники (СОНТ) в условиях рыночных отношений одним из основных и доминирующих вопросов является определение и прогнозирование процессов ее реализации. Плановый период времени при этом охватывает значительную часть жизненного цикла моделей: от начала разработки до прекращения их производства и реализации. Этот период  $T$  называется жизненным циклом товара (ЖЦТ). Он заканчивается, когда изделие прекращают покупать. Такой подход в большей степени соответствует целям товаропроизводителей в условиях рыночных отношений. Анализ и исследование жизненных циклов на стадии производства и реализации продукции в настоящее время, как правило,

направлено на решение вопросов моделирования динамики и объемов выпуска продукции [1, 2, 3 и др.].

Однако такой подход носит ограниченный характер, так как в условиях рыночных отношений главной целью товаропроизводителей является не производство продукции, а ее реализация. Функция производства продукции является при этом подчиненной, зависящей от функции сбыта. Следовательно, более приоритетным является в данном случае исследование жизненного цикла товара и главным объектом анализа при этом должна служить функция сбыта. Сложность и особенности реализации такой направленности исследований заключается в том, что сбыт продукции, являющийся по сути фактором объемов и динамики производства, по времени проявления отстает от последнего.

Это существенно усложняет исследование причинно - следственных связей процессов ЖЦТ, что обуславливает необходимость организации непрерывного упреждающего прогнозирования и планирования сбыта на основе системного анализа рынков сбыта в комплексе с затратными и объемными технико-экономическими показателями производства. Высокая неопределенность рынка, сложность в нахождении реальной потребности в новом оборудовании и другие факторы вероятностной природы требуют тщательного обоснования решения по его закупке и оценки эффективности связанных с этим капитальных вложений. Результативность этапа внедрения новой продукции длительного пользования во многом определяется выбором стратегии временной дифференциации цен с целью освоения рынка и увеличения жизненного цикла товара.

Как показывает зарубежный опыт в условиях развитой конкуренции фирма, выходящая на рынок с новой продукцией, должна осуществлять гибкую ценовую стратегию, нередко идти на ценовые уступки с целью "завоевания" потребителей. По мере формирования спроса на изделие цены могут увеличиваться, однако, фактор снижения цены сохраняется в связи с ротацией потребителей продукции фирмы и появлением новой продукции фирм-конкурентов [4].

Стратегия деятельности фирм в области ценообразования и производства новой продукции во многом зависит от времени выхода на рынок и уровня качества товара, которые во многом определяются процессом СОНТ. Следовательно, более полная реализация системных принципов исследования предполагает включение в систему прогнозирования и управления ЖЦТ процессов организации и планирования СОНТ, оказывающих доминирующее влияние на результаты последующей деятельности. В этом случае исследование экономической эффективности обновления техники в сфере ее создания и производства охватывает целый комплекс взаимосвязанных показателей качественного, объемного, затратного и пространственно-временного характера, проявляющих себя на протяжении ЖЦТ.

Речь главным образом идет об установлении причинно-следственных связей и определении концепции оптимизации исследуемых процессов по критерию суммарной прибыли за период ЖЦТ. Одним из основных вопросов исследования является при этом прогнозирование и определение наиболее вероятной траектории объема продаж за период ЖЦТ как функции факторов процессов СОНТ, состояния рынка и сферы производства.

Рассмотрим один из возможных подходов к решению данной задачи. При элиминировании воздействия цены взяв  $C = \text{const}$ , траектория объема реализации про-

дукции фиксированного качества за период ее производства и предложения на рынке сбыта будет определяться двумя разнонаправленными тенденциями. Первая особенно заметно проявляет себя на этапе внедрения и освоения техники и заключается в увеличении опроса на нее по мере изучения и освоения ее потребителем. Вторая теоретически действует постоянно и обусловлена непрерывностью НТП и морального устаревания любой продукции.

Эта тенденция проявляется в постепенном уменьшении спроса и сокращении со временем объема продаж. Траектория кривой объема продаж для традиционного жизненного цикла товарами [5] описывается достаточно сложной кривой, состоящей из двух частей. Первая представляет собой S-образную кривую, включающую этапы внедрения, роста и частично зрелости, а вторая - уменьшающуюся часть параболы. Эти части кривой соединяются в момент времени максимального объема реализации изделий.

Этот момент времени делит весь период производства и реализации оцениваемой модели техники на два этапа – роста и снижения продаж. Окончание процесса реализации изделий происходит в момент времени, когда продукция данного качества считается морально устаревшей. В целом задача исследования рассматриваемых процессов представляется как непрерывное, начиная с ранних стадий СОНТ, систематически уточняющиеся моделирование и прогнозирование объема реализации оцениваемой продукции.

При формализации функции объема продаж следует, учитывать следующие обстоятельства. Во-первых, вид зависимости должен отражать экономическое содержание формализуемого процесса. С другой стороны, важное значение имеет сам метод формализации исследуемой зависимости, трудоемкость его реализации, адекватность и точность аппроксимации описываемых процессов. Как отмечалось выше, традиционно формализация объемов реализации (или производства) осуществлялась как однофакторная зависимость от времени. Использование метода наименьших квадратов или метода Чебышева позволяет при этом в форме полинома  $n$ -й степени достаточно точно аппроксимировать весьма сложные нелинейные и немонотонные зависимости. Однако для формализации многофакторных зависимостей использование полиномиальной функции, во-первых, приводит к существенному росту трудоемкости (либо машинного времени) расчетов. Кроме того, как правило, нередко, при этом искажается экономический смысл зависимостей. Этого недостатка во многих случаях лишена мультипликативная функция.

Однако эта функция, обладая достаточной гибкостью для отражения тенденций исследуемых показателей, тем не менее практически применима лишь для выражения монотонных зависимостей функции от отдельных факторов. Учитывая закономерности формирования объема продаж с проявлением как монотонных, так и немонотонных зависимостей, представляется целесообразным для формализации этого показателя использовать функцию, объединяющую свойства полиномиальной и мультипликативной регрессий.

При этом в форме мультипликативных регрессий выражается зависимость объема реализации от показателей качества продукции, информированности ее потребителя и состояния рынка сбыта. Сложное влияние цены на объем продаж выражается степенной функцией с показателем степени полиномиального вида как функции от времени. Переменный показатель степени при  $C$  отражает влияние процессов

освоения рынка и морального старения, которые даже при неизменной цене заметно влияют на объем реализации. В целом для  $t$ -го периода объем продаж  $\Pi_t$  можно представить в виде:

$$\Pi_t = a \prod_{i=1}^m x_{it}^{b_i} C_t^{-(\alpha - \gamma \cdot t + \varphi \cdot t^2)},$$

где  $a$  - параметр формулы, отражающий влияние неучтенных факторов на объем продаж  $\Pi_t$ ;  $m$  - количество учтенных факторов, исключая цену изделия;  $x_{it}$ ,  $b_i$  - значение  $i$ -го фактора в  $t$ -период и показатель степени его влияния на  $t$ -период и показатель степени его влияния на  $\Pi_t$ ;  $C_t$  - цена изделий в  $t$ -и период;  $\alpha$  - показатель степени отражающий среднюю эластичность спроса на изделие;  $\varphi$ ,  $\gamma$  - показатели степени влияния на спрос процессов освоения рынка сбыта и морального старения оцениваемой продукции.

При неизменности и усреднении влияния показателей, входящих в мультипликативную часть приведенной формулы /кроме цены/ в более общем виде объем реализации можно выразить:

$$\Pi_t = A \cdot C_t^{-(\alpha - \gamma t + \varphi t^2)}.$$

Определение параметров вышеприведенной и данной формул можно осуществить с помощью метода наименьших квадратов, после их предварительной линеаризации. После логарифмирования и преобразований исходное уравнение для определения параметров имеет вид для  $N$  наблюдений.

$$U = \sum_{i=1}^N [\ln \Pi_i - \ln A + (\alpha - \gamma t_i + \varphi t_i^2) \ln C_i]^2 \rightarrow \max.$$

Определение частных производных функции по искомым параметрам  $\ln A$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\varphi$  и приравнивание их к нулю позволяет получить систему линейных уравнений, необходимую для решения задачи.

Следует отметить, что число членов и степень полинома в формуле объема продаж может увеличиваться до уровня, обеспечиваемого необходимой точностью аппроксимации.

Прогнозирование объема продаж определяет, в свою очередь, стратегию производства новой техники. Это позволяет осуществлять анализ, исследование и прогнозирование показателей сферы производства: выпусков изделий и их себестоимости по планово-учетным периодам этапа производства модели техники, а также капитальных вложений в сферу производства и потребной величины производственных фондов.

Таким образом могут решаться и оптимизироваться экономические задачи освоения производства новой техники.

**Литература:** 1. Гринчель Т.П. Планирование «жизненного цикла» промышленной продукции на примере машиностроения. Л.: изд. ЛГУ, 1980., 144с. 2. Кондратьев Н.Д. Проблемы экономической динамики. М.: Экономика, 1989., 526с. 3. Яковенко Е.Г., Басс М.И., Махров Н.В. Циклы жизни экономический процессов, объектов и систем. М.: Наука, 1991., 192с. 4. Klemperep P. Price Wars Caused by switching costs // Review of Economic Studies. – 1989. – 56, №3. – p.405-420. 5. Эванс Дж Берман. Маркетинг (Пер. с англ.). М.: Экономика, 1999., 350с.

## ВИБРАЦИОННАЯ ОБРАБОТКА И ЕЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Волков И.В., научный сотрудник, Николаенко А.П., аспирант

(г. Луганск, Украина)

*In the article advantages of vibromachining, as a perspective method and one of the most effective means to produce the required quality of superficial layer of details of the wide nomenclature are considered. The equipment on which vibromachining is carried out also is submitted.*

В современном машиностроении по-прежнему остаётся актуальной проблема повышения качества изделий из высокопрочных материалов, в том числе и стали, для повышения надежности и долговечности машин при одновременном снижении их металлоемкости. Работоспособность деталей, узлов и машин в целом существенно зависит от качества поверхностного слоя, получаемого при изготовлении деталей. При этом остро стоит вопрос повышения экономических показателей металлообработки, что выдвигает на первый план нетрадиционные методы обработки, в том числе вибрационные.

Высокие показатели по универсальности, производительности, качеству получаемой поверхности прочно закрепили за вибрационной обработкой место среди перспективных способов изготовления деталей машин и приборов, а также товаров народного потребления.

Вибрационная обработка позволяет значительно механизировать операции по удалению и скруглению острых кромок, уменьшению шероховатости поверхности, особенно при обработке сложнопрофильных деталей, что позволяет снизить трудоемкость отделочно-зачистных операций.

Анализ показывает, что эксплуатационные качества деталей, прошедших операцию вибрационной обработки в среде свободных абразивов, выше, чем при использовании традиционных методов шлифования за счет формирования в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений, образования наклепа, создания мелкодисперсной структуры в соответствии с эксплуатационными требованиями к качеству поверхностного слоя.

Вибрационная обработка в зависимости от характера применяемой рабочей среды представляет собой механический или химико-механический процесс съёма мельчайших частиц металла с обрабатываемой поверхности, а также сглаживание микронеровностей путем их пластического деформирования. Процесс сопровождается последовательным нанесением на обрабатываемую поверхность большого числа микроударов, вызванных действием направленных вибраций (колебаний), которые подаются к детали через рабочий инструмент. Обрабатывающая рабочая среда-инструмент состоит из множества твердых частиц в виде стальных шариков или абразивных гранул и жидкости, которые под действием интенсивных колебаний приобретают свойство равномерно сопрягаться с произвольно сложной поверхностью обрабатываемой детали, в результате чего происходит упруго-пластическое деформирование, обеспечивающее равномерную обработку и упрочнение поверхностного слоя

Процессы виброударной обработки являются одним из наиболее эффективных средств обеспечения требуемого качества поверхностного слоя деталей. Применение ВиО позволяет повысить сопротивление усталости и стабильность характери-

стик качества поверхностей ответственных деталей. Достоинствами данного метода обработки являются низкая себестоимость, простота конструкции ВиО-станков, возможность одновременной обработки значительного количества деталей на универсальном оборудовании.

Упрочняющая виброобработка улучшает эксплуатационные свойства деталей, повышая износостойкость и усталостную прочность за счет повышения микротвердости и создания сжимающих напряжений в поверхностном слое. Достижимый уровень свойств материала деформированных деталей связан с изменением макро- и микроструктуры. Установлено, что структура материала деталей, подвергнутых вибрационному нагружению, в зоне обработки более равномерная и мелкозернистая. Упрочнение обрабатываемой поверхности при вибрационной обработке способствует снижению величины износа в 1,13 – 1,48 раза. Процессы виброударного упрочнения применяются на финишных операциях, после формообразующей механической обработки и достижения необходимой точности размеров, в качестве окончательной отделочно-упрочняющей обработки, для достижения требуемого качества поверхностного слоя деталей сложной формы, в ряде случаев в дополнение к методам химико-термического упрочнения; деталей, изготовленных из высокопрочных материалов, работающих в условиях интенсивной знакопеременной и контактной силовых нагрузок, коррозионного воздействия.

Вибрационные методы обработки получили за последнее время в разных сферах народного хозяйства достаточно широкое применение. Малая энергоемкость систем виброобработки, относительно низкая стоимость технологического оборудования и простота его обслуживания позволяют эффективно применять виброобработку не только на крупных предприятиях, но и в условиях мелких и средних производств.

Обладая высокой степенью универсальности и широкими технологическими возможностями, технология ВиО обеспечивает обработку деталей широкой номенклатуры.

В НИЛ ОСА ВНУ им. В. Даля длительное время разрабатывается технология вибрационной обработки деталей и оборудование для ее осуществления с рабочим объемом контейнера от 3 до 1000 литров. Станки выпускаются с U-образной камерой Ивановским станкостроительным заводом. По специальному заказу могут быть изготовлены станки с большим объемом контейнера для обработки крупногабаритных деталей.

В состав оборудования кроме блоков обработки могут включаться сервисные блоки мойки и сушки деталей. В зависимости от габаритов обрабатываемых деталей и требований производства может быть предложен комплект оборудования с необходимым уровнем автоматизации.

Режим обработки может изменяться регулированием частоты и амплитуды вибраций. Шумоподавляющая обшивка и крышка позволяют создать комфортные условия работы. Выгрузка может осуществляться из контейнера сверху вручную или при помощи применения вспомогательного разгрузочного устройства. Для конкретного производства проектируются и изготавливаются механизмы и оборудование для автоматического отделения деталей от среды.

Станки просты и надежны в использовании, что подтверждено многолетней эксплуатацией на многих предприятиях Украины и СНГ.

На оборудовании можно осуществлять весь цикл финишных операций от от-

делочно-зачистной обработки (удаление заусенцев, ржавчины, окалины, шлифование, полирование) до виброхимической обработки (обезжиривание, удаление дефектного слоя, травление, подготовка поверхности под гальванопокрытия, покраску и т.д.).

Таблица 1.

Технические характеристики ВиО-станков лаборатории НИЛ ОСА ВНУ им. В. Даля

Характеристики	Модель Станка							
	ВМИ 1003	ВМСИ 25М	УВИ 25	ЛМСИ 50	ВМИ 1004	ЛМСИ 100	ВМИ 1004А	ЛМСИ 250
Емкость контейнера, дм <sup>3</sup>	15	25	25	50	80	100	120	250
Амплитуда, мм	0,5 – 2,0	0,2 – 2,5	0,2 – 4,0	0,2 – 3,0	0,2 – 3,0	0,2 – 3,2	0,5 – 3,5	0,2 – 3,2
Частота, Гц	35, 63	50, 54, 63, 67	34, 43, 50, 54, 63, 67	50, 54, 63	29, 34, 43	33, 42, 50	29, 34, 43	33, 42, 50
Мощность привода, кВт	0,7	4,0	4,5	4,0	7,5	7,0	7,0	12,0
Габариты, мм	600× 570× 1100	1550× 650× 1080	1600× 750× 1000	1650× 800× 1150	2050× 920× 1350	2100× 950× 1200	2260× 1050× 1350	2250× 1100× 1450
Масса, кг	200	500	450	1300	3880	2400	3800	3200

Особое внимание уделено при проектировании технологического процесса сопутствующим химическим растворам, выбираемым в зависимости от свойств материала и обеспечивающим активизацию процесса или пассивирование поверхности. За последние годы лаборатория ВНУ им. В. Даля добилась значительных успехов по обработке мелких, крупногабаритных деталей, деталей сложной пространственной формы и деталей из труднообрабатываемых материалов. Сегодня устойчиво в результате вибрационной обработки можно скруглить острые кромки с заданным радиусом, получить шероховатость 0,63 – 0,32, упрочнить поверхность на глубину 0,01 – 0,06 мм и повысить износостойкость, и маслостойкость изделий.

УДК 621.93.026

### ВЛИЯНИЕ ОСЕВОЙ ЖЕСТКОСТИ АКВР НА НЕПЛОСКОСТНОСТЬ ОТРЕЗАЕМЫХ ПЛАСТИН

Ерошин С.С., докт. техн. наук, Таращанский М.Т.

*In work the analytical parity connecting an axial component of force of cutting and geometrical parameters of a detachable circle with nonflatness cut off by means of ID Saw Blade of plates is deduced*

Одним из параметров, характеризующих точность отрезаемых пластин при разделении слитка монокристаллов на пластины с помощью АКВР, является неплоскостность.

Для описания указанного несовершенства геометрической формы отрезаемых пластин введем понятие непрямолинейности реза на глубине врезания  $s$  как угол  $\alpha$

между нормалью к образующей слитка и касательной к изогнутой поверхности отрезного круга, лежащими в плоскости резания в точке приложения силы резания (рис.1), т.е., пренебрегая кривизной поверхности отрезного круга, этот угол можно определить как:

$$\alpha(s) = \arcsin \frac{w(s)}{l} = \arcsin \frac{P_x(s)w_0}{l}.$$

Здесь  $w(s)$  - прогиб круга на глубине резания  $s$ , возникающий под действием осевой составляющей  $P_x$  силы резания,  $w_0$  - прогиб круга под действием единичной силы и  $l$  - разность между внутренним радиусом  $a$  зажимных фланцев отрезного круга и радиусом режущей кромки. Если  $w \neq 0$ , тогда плоскость, в которой лежит дуга контакта, не перпендикулярна образующей слитка и потому является образующей тыльной поверхности отрезаемой пластины. При этом максимальная величина  $g$  отклонения поверхности пластины от идеального реза будет соответствовать максимальной дуге контакта, достигаемой при совпадении ее хорды с диаметром слитка.

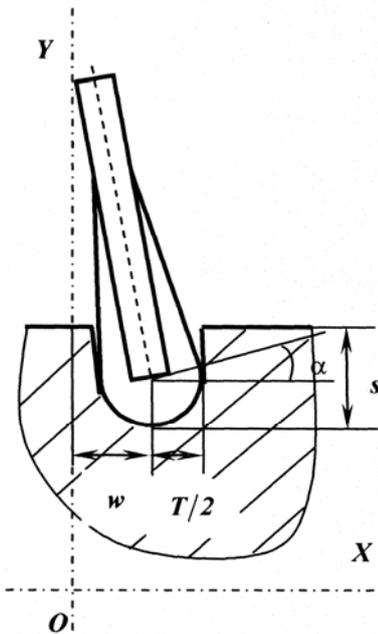


Рис.1. Отклонение от прямолинейности резания.

Если средняя величина осевой составляющей  $\overline{P_x}$  не зависит от глубины врезания, тогда можно допустить, что и средняя величина  $\overline{\alpha(s)}$  не зависит от глубины врезания. Тогда, пренебрегая кривизной поверхности отрезного круга, из простых геометрических построений вычисляется искомое отклонение  $g$  как:

$$g = \left( R_{кр} - \sqrt{R_{кр}^2 - r_{сл}^2} \right) \operatorname{tg} \overline{\alpha} = \left( R_{кр} - \sqrt{R_{кр}^2 - r_{сл}^2} \right) \operatorname{tg} \left( \arcsin \frac{\overline{P_x} w_0}{l} \right) = \left( R_{кр} - \sqrt{R_{кр}^2 - r_{сл}^2} \right) \frac{\overline{P_x} w_0}{l} \Big/ \sqrt{1 - \frac{\overline{P_x}^2 w_0^2}{l^2}}.$$

где  $R_{кр}$  - радиус режущей кромки отрезного круга;  $r_{сл}$  - радиус разрезаемого слитка;  $\overline{P_x}$  - среднее значение осевой составляющей силы резания. Для  $\frac{\overline{P_x} w_0}{l} \ll 1$  полу-

чаем  $g = \left( R_{кр} - \sqrt{R_{кр}^2 - r_{сл}^2} \right) \frac{\overline{P_x} w_0}{l}$ . Величина  $w_0$  может быть интерпретирована как

податливость режущей кромки, т.е. величина, обратная жесткости  $J$  режущей кромки. Использование осевой жесткости вместо прогибов представляется более предпочтительным, поскольку этот параметр аккумулирует в себе как показатели механических характеристик материала круга, так и его геометрические параметры [1]. Таким образом,

$$g = \left( R_{кр} - \sqrt{R_{кр}^2 - r_{сл}^2} \right) \frac{\bar{P}_x}{J \cdot l}.$$

Используя выражение жесткости для равномерно натянутого отрезного круга, полученное в работе [2], имеем следующее выражение для величины  $g$ :

$$g = \bar{P}_x a^2 \left( \alpha - \sqrt{\alpha^2 - \left( \frac{r_{сл}}{a} \right)^2} \right) \cdot \frac{(1-\alpha)(1+\alpha)^2}{4qh},$$

где  $\alpha = R_{кр} / h$ ;  $h$  – толщина корпуса отрезного круга;  $q$  – величина растягивающих усилий, приложенных к внешнему контуру отрезного круга.

Для проверки адекватности полученных формул реально существующей взаимосвязи между исследуемыми величинами проводилось сравнение опубликованных в литературе экспериментальных данных с вычислениями согласно полученным формулам.

Согласно данным работы [3],  $\frac{g}{\bar{P}_x} \approx 0,075$  мкм/Г. Значение величины натяжения  $q$  авторы не приводят. Поэтому вычисления проводились для типичного значения  $q = 1500$  МПа [4]. Значения остальных параметров выбирались следующими:  $\alpha = 0,3 \dots 0,4$ ;  $h = 0,1 \dots 0,2$  мм;  $r_{сл} / \alpha = 0,18 \dots 0,27$ ;  $a = 300 \dots 700$  мм. Вычисления согласно полученной формуле дают  $\frac{g}{\bar{P}_x} = 0,063 \dots 0,091$  мкм/Г. Учитывая качественный

характер проверки, полученные результаты следует признать удовлетворительными.

Таким образом, в настоящей работе впервые получена аналитическая зависимость, связывающая осевую составляющую силы резания и геометрические параметры отрезного круга с точностными параметрами отрезаемых пластин. Проведенная проверка полученной зависимости показала, что она может быть использована при решении различных прикладных задач алмазно-абразивной обработки полупроводниковых и диэлектрических материалов с применением отрезных алмазных кругов с внутренней режущей кромкой.

**Литература:** 1. Петасюк Г.А. К вопросу учета влияния осевой жесткости отрезных алмазных кругов на ширину пропила и прямолинейность реза // Сверхтвердые материалы, 1998, №2. – С. 50-57. 2. Таращанский М.Т. Определение степени неравномерности натяжения кругов АКВР // Вісник Східноукраїнського національного університету. – 2003, вип. 6(64). – С. 25-33. 3. Голиков В.И., Грошин С.С., Приходьмо В.Л. Влияние сил резания на точность отрезаемых пластин // Синтетические алмазы. – 1975, №4. – С. 46-48. 4. Шуваев Г.В., Сорокин В.К., Зимицкий Ю.Н. Резка неметаллических материалов алмазными кругами. – М.: Машиностроение, 1989. – 80 с.

**УДК 621.923**

## **ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ**

**Терентьев А. Ю.** (г. Киев Украина)

*Economic efficiency of process of cutting.*

Машиностроительная отрасль в последнее время развивается стабильными темпами. Стадия выживания, когда в большей степени следили за экономией каждой копейки, и важно было не столько развитие, сколько сохранение производ-

ственного потенциала, на многих заводах уже завершилась. И многие прогрессивные руководители, в настоящий момент вплотную подошли к стратегическому планированию развития предприятия.

На этом этапе возникает вопрос об экономической эффективности предприятия в целом, бизнес-единиц, технологических цепочек и технологических единиц. Все чаще возникает потребность в замене устаревшего неэффективного оборудования, которого в Украине более 80%. А инвестиции в новое оборудование требуют быстрой окупаемости.

Но как просчитать эффективность того или иного оборудования?

### **Методы расчета себестоимости обработки**

- процентный метод;
- стоимость станкочаса;
- непосредственный учет затрат.

#### **Процентный метод**

Себестоимость = трудоемкость \*k1\*k2\*k3 + материалы

При просчете себестоимости изготовления деталей процентным методом трудоемкость изготовления детали умножается на коэффициент затрат всего предприятия.

Исходные данные:

- фонд заработной платы (k1);
- общезаводские затраты (k2);
- общецеховые затраты (k3);
- материалы.

Критерий: трудоемкость или нормочасы

#### Достоинства:

- минимальная трудоемкость расчетов;
- все данные доступны;
- хорошая сопоставимость с общими показателями.

#### Недостатки:

- нет связи между стоимостью операции и расходами на технологическое оборудование;
- большая ошибка при расчете эффекта от усовершенствований и внедрений;
- невозможно найти источник потерь или экономии.

### **Расчет себестоимости изготовления через станкочас**

Стоимость станкочаса = Расчет затрат на эксплуатацию оборудования и трудозатрат,

Себестоимость = Время выполнения операции\* стоимость станкочаса + материалы + инструмент.

Исходные данные:

- расход материалов и инструмента;
- станок (стоимость, период окупаемости, коэффициент загрузки);
- фонд оплаты рабочего времени.

Критерий распределения: Производительность (операционное время)

#### Достоинства

- точность расчета себестоимости детали по переходам и операциям;

- непосредственно показывает где и за счет чего достигнута экономия;
- позволяет обосновать оптимальные режимы обработки.

### Недостатки

- исходные данные не всегда доступны;
- трудоемкость расчетов суммарных расходов по всему предприятию;
- сохраняется ошибка при распределении общих затрат.

### **Непосредственный учет затрат**

Каждая трата или действие относится на конкретный проект – изделие- деталь. Ничто не делается просто так, все можно распределить.

Исходные данные:

- тотальный учет и контроль всех расходов и действий персонала.

### Достоинства

- самый точный метод.

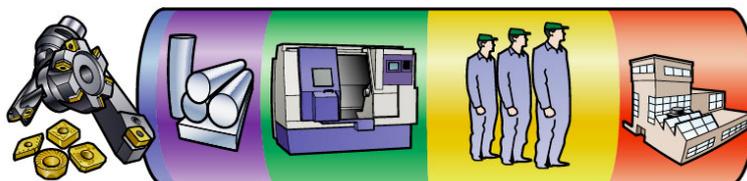
### Недостатки

- самый трудоемкий метод;
- требует идеального порядка и пунктуальности всех сотрудников.

### Однако...

Приобретает все большую популярность на предприятиях с глубокой автоматизацией бизнес процессов.

Затраты на механическую обработку можно разделить на постоянные и переменные затраты.



Переменные затраты возникают в процессе производства продукции:

- режущие инструменты (3%, в некоторых случаях до 7%);
- расходуемые материалы и заготовки (17%).

Постоянные затраты существуют всегда, не зависимо от объема производства:

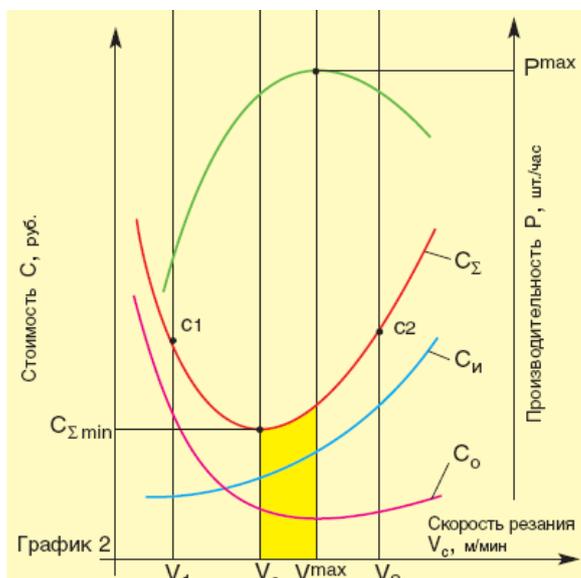
- оборудование (27%);
- трудовые ресурсы (31%);
- здания, административные расходы и т.д. (22%).

Рассмотрим составляющие затрат графически:

ски:

$P$  - производительность  
 $C_0$  - постоянные затраты  
 $C_{\text{и}}$  - переменные затраты  
 $C_{\text{общ}}$  - общие затраты

С изменением скорости резания определяющим в переменных затратах становится стоимость инструментов (стоимость заготовок и расходников постоянны). С ростом скорости резания растут расходы на инструмент  $C_{\text{и}}$  в пересчете на одну деталь, т.к. стойкость в количестве из-



готовляемых деталей с увеличением скорости падает. В то же время с ростом скорости резания падает трудоемкость изготовления детали в станко-минутах, и соответственно постоянные затраты  $C_0$  на эксплуатацию оборудования. Сложив постоянные  $C_0$  и переменные  $C_1$  затраты получим график общих затрат  $C$  на обработку одной детали.

Точка минимума  $C_{min}$  соответствует экономически обоснованной скорости резания. Точка максимума  $P_{max}$  соответствует максимально оправданной скорости резания (без расширения производственных площадей). Область между двумя этими точками – зона эффективной работы.

### Инструменты повышения эффективности производства

Фирма Сандвик занимает лидирующие позиции среди мировых производителей металлорежущего инструмента и стремится стать для своих заказчиков не только поставщиком высококачественного инструмента, сколько партнером по повышению эффективности производств. Это достигается путем повышения производительности, внедрения прогрессивных технологий, оптимизацией инструментального хозяйства и пр.



В нашем распоряжении команда высокопрофессиональных технических специалистов способных решить наиболее сложные задачи по организации эффективных технологических процессов.

#### 4225 - универсальный сплав для точения стали.

Сплав для получистовой обработки. Нет компромиса. Сплав сочетает в себе как прочность черного сплава, так износостойкость чистового.

Специальная технология покрытия передней поверхности.



#### Сверление

Сверло CoroDrill 880 с механическим креплением твердосплавных пластин работает по технологии для достижения сбалансированности сил резания:

- мягкое врезание
- мягкая и стабильная работа сверла в процессе сверления
- возможность увеличения подачи
- результат - точное отверстие



Полная программа твердосплавных сверл: диаметры от 0.3 мм до 20 мм для большинства типов материалов

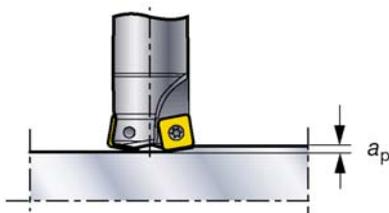
#### Высокопроизводительные решения для фрезерования

**CoroMill 210** - концепция фрезерования с большими подачами.

Подача стола до 7000 мм/мин, подача на зуб до 4 мм/зуб.

**CoroMill 245** – универсальная торцевая фреза: операции – от черновых (глубина до 10 мм) до чистовых (шероховатость до  $Ra=0.8$ ).

Цельнотвердосплавные фрезы **CoroMill Plura**: диаметры от 0.3 мм, обработка материалов с твердостью до 65 HRC. И многое-многое другое. Номенклатура выпускаемых инструментов – более 30 000 наименований высокопроизводительных решений.



SANDVIK Coromant стремится стать надежным партнером в повышении эффективности Вашего производства. ПИИ «САНДВИК» Украина, 01027, г.Киев, ул.Б.Житомирская, 27, т. (044) 272-43-21, 272-43-23

УДК 621.924.6.

## РАЗРАБОТКА НОВОГО ВИДА ТОРЦОВЫХ ФРЕЗ И ШАБЕРОВ С ТАНГЕНЦИАЛЬНЫМ КРЕПЛЕНИЕМ ПЛАСТИН

**Настасенко В.А.**, канд. техн. наук, **Урсал К.Г.**, магистр (г. Херсон, Украина)

*New design of face milling cutters and scrapes with tangential mechanical fixing of cutting or deforming plates made of hard alloys and superhard tool materials is suggested here. The estimation of their possible application for finishing and roughing cutting and deforming machining of workpieces is given.*

**Анализ состояния проблемы и постановка задачи.** Работа относится к области машиностроения, в частности – к технологическим процессам чистовой и черновой обработки резанием или деформированием, а также к режущим и деформирующим инструментам, типа фрез и шаберов, включая рабочие пластины к ним. В ее основу положена разработка новых конструкций торцовых фрез и шаберов с тангенциальным механическим креплением режущих или деформирующих пластин из твердого сплава и сверхтвердых инструментальных материалов, с оценкой возможности их применения для чистовой и черновой режущей и деформирующей обработки изделий, что представляет большой практический и теоретический интерес, как для проектирования подобного класса инструментов, так и для их применения в условиях реального производства.

Технологический процесс шабрения применяют для отделочной обработки изделий, при котором предварительно обработанные резанием плоские, цилиндрические или конические поверхности окончательно обрабатывают путем снятия тонких стружек шабером – слесарным инструментом в виде заостренного с одной стороны прямоугольного или трехгранного стального бруска с рукояткой, для придания ему рабочих движений могут применять машины с пневматическим или электрическим приводом и кривошипным механизмом, преобразующим вращение гибкого или эксцентрикового (коленчатого) вала в возвратно-поступательные движения [1].

Главным недостатком такого инструмента является низкая производительность, а способа обработки – наличие возвратно-поступательных движений, что ведет к холостому ходу инструмента и ограничивает технологические режимы обработки.

Устранение указанных недостатков является 1-й целью выполненной работы.

Известны также торцовые фрезы с тангенциальным механическим креплением режущих пластин четырехгранной формы, имеющих отверстия, расположенные по их центру. При этом фреза состоит из корпуса, на наружной боковой поверхности

которого выполнены под углом  $\gamma_{oc}$  к оси фрезы открытые гнезда-пазы под пластины, имеющие радиальные опорные базовые поверхности, а осевыми опорными базами для пластин служат запрессованные в пазы корпуса штифты с лысками, к которым поджимаются пластины путем крепления контактирующим с фаской отверстия винтом с конической головкой, который за счет смещения резьбового отверстия под винт поджимает пластину к осевой и радиальной базовым поверхностям паза [2].

Недостатками данных фрез являются:

1. Применение лишь для черновой обработки со снятием стружки большой толщины, т.к. установка пластин к поверхности резания выполнена не острой режущей кромкой, а поверхностью сопряжения боковых сторон с округлением вершинной режущей кромки  $r \geq 0,2$  мм, что исключает возможность снятия тонких стружек, характерных для чистовой обработки.

2. Применение лишь четырехгранных пластин, что ограничивает количество их переустановок после износа режущих кромок.

3. Применение лишь пластин с отверстием, что ограничивает возможности крепления силовыми нагрузками на штифт центрального отверстия.

Исходя из выявленных недостатков, можно сделать вывод, что процесс резания такими фрезами протекает в затруднительных условиях, поскольку рекомендуемый [3] радиус округления режущих кромок  $r$  не должен превышать 0,02 мм, иначе процесс резания значительно усложняется за счет больших деформаций в зоне резания и неблагоприятных условий отделения стружки.

Для улучшения режущих свойств фрезы необходимо устранение указанных недостатков, что является 2-й целью выполненной работы.

*Разработка путей реализации поставленной цели.* Для решения данной задачи использовался метод АРИЗ [4]. В рамках принципа “наоборот” и “принципа двойственности” [5], сущность которого заключается в сочетании взаимоположенных свойств или качеств объекта, было предложено применять базовые фрезы [2] как деформирующий инструмент для чистовой обработки. Наиболее благоприятный способ деформаций – при вращении фрезы в обратную сторону. Дальнейший анализ исходных конструкций фрез и пластин на базе приема “местное качество” [4], сущность которого – устранить мешающие части, показал, что вершинные участки с радиусом  $r$  могут быть устранены за счет дополнительной заточки канавок на вершинах пластин. Такая конструкция целесообразна также для фрез-шабров.

Исходя из предлагаемого изменения конструкции пластин, можно выделить следующие достоинства усовершенствованных фрез: 1) металл у корня стружки не сминается, а режется, т.к. возможно уменьшение радиуса округления вершинных режущих кромок с 0,2 до 0,01 мм; 2) пластины с данным радиусом округления будут срезать стружку соизмеримую с радиусом этого округления, что позволяет применить их для тонкой и чистовой обработки, или шабрения; 3) исключаются значительные деформации в зоне резания и связанный с ними значительный износ режущих кромок пластин; 4) уменьшаются силы и мощность затрачиваемые на резание, в результате чего уменьшаются расход силовой электроэнергии и износ оборудования.

Кроме усовершенствования пластин, усовершенствована также конструкция предлагаемых фрез за счет возможности использования пластин любой формы в новых вариантах их крепления [6].

Предлагаемые фрезы состоят из корпуса и многогранных режущих пластин,

для которых по периметру корпуса выполнены открытые пазы, имеющие тангенциальную опорную поверхность под основание пластины, обеспечивающую задний угол по наружной поверхности и продольную опорную поверхность под боковую сторону пластины, обеспечивающую задний угол  $\alpha$  с плоскостью резания. В первом варианте их исполнения крепление пластин возможно винтом. Во втором исполнении пластина крепится винтом и штифтом с лыской. В третьем исполнении пластины устанавливаются на штифт и прижимаются эксцентрично установленным винтом. В четвертом исполнении для разгрузки штифта могут быть выполнены на боковой поверхности паза выступы, в пятом исполнении исключены штифты и применены пластины без отверстия.

Аналогичные варианты крепления возможны для трехгранных пластин, для трехгранных пластин с выступами, для квадратных, пятигранных, шестигранных и восьмигранных пластин, что увеличивает количество режущих канавок и возможностей их переустановок при износе, создавая дополнительный эффект за счет сокращения расхода пластин. При использовании круглых режущих пластин имеется реальная возможность увеличения режущих канавок на пластине до 10 и более, что адекватно повышает количество возможных переустановок. Для них конструкция корпуса отличается от предыдущих лишь круговой формой упорной поверхности паза. Возможно также применение пластин с наклонными стружечными канавками и со скругленной боковой поверхностью, а также применение пластин с чередующимся наклоном канавок, что облегчает резание. Все приведенные конструкции пластин и инструментов эффективны для шаберов.

В настоящее время разработаны технология и оснастка для изготовления предлагаемых фрез и пластин.

**Литература:** 1. Политехнический словарь /Ред. кол.: А. Ю. Ишлинский (гл. ред.) и др. –3-е изд., перераб. и доп. –М.: Советская энциклопедия, 1989.-с.597. 2. Сборный твердосплавной инструмент. Г.Л.Хае, В.М.Гах, К.Г.Громаков и др.: Под общ. ред Г.Л.Хаета. – М.: Машиностроение, 1989. с. 158-159. 3. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с. 4. Альтшуллер Г.С. Алгоритм изобретения. –М.: Московский рабочий. 1973. – 296 с. 5. Настасенко В.А. Двойственность вариантов конструирования как один из критериев оптимизации. //Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века. Материалы VI междунар. науч.-техн.конф. – Донецк: ДонГТУ, 1999. Т2. - с. 193-196. 6. Настасенко В.А., Урсал К.Г. Заявка на патент Российской Федерации. № 2005110805/20 от 13.04.05. Торцовая чистовая или черновая режущеедеформирующая фреза, фреза-шабер, способ обработки ими, рабочие пластины к ним и способ их изготовления.

**УДК 621.83.001.**

## **ПОДШИПНИКИ КАЧЕНИЯ, УМЕНЬШАЮЩИЙ РЕЗОНАНС ПРИ ПУСКЕ И ТОРМОЖЕНИИ МАШИН**

**Настасенко В.А.**, канд. техн. наук, **Проценко В.А.**, (г. Херсон, Украина)

*Basing on the analysis of the conditions of the appearance of resonanse, vibrations in the design of machine shafts the new design of rolling bearings which could reduce them are suggested. Manufacturing procecceses, tools and equipment for their fabrication are developed.*

*Анализ состояния проблемы и постановка задачи.* Работа относится к области машиностроения и деталей машин, в частности – к радиальным и радиально-упорным подшипникам качения с шариковыми и роликовыми телами качения, ис-

пользуемым в различных станках, турбинах и в других приборах, машинах и механизмах, в работе которых возможно появление резонанса.

Резонанс – это явление, характеризующееся существенным возрастанием амплитуды вынужденных колебаний системы, возникающее при приближении частоты колебаний внешнего воздействия на систему, к частоте ее собственных колебаний [1]. Для металлорежущих станков данное явление наступает тогда, когда под действием внешних сил, например, от приводных устройств, или сил резания, колебания его шпинделя и валов, с присоединенными к ним деталями, приближается к частоте их собственных колебаний. При этом резко возрастают напряжения в валах, которые определяется уже не внешней нагрузкой, а силами инерции колеблющихся масс. Таким образом, резонанс представляет большую опасность для прочности конструкций, а для станков – и для их точности, т.к. ведет к разбивке подшипников и их гнезд [2].

Наиболее часто резонансных явлений избегают за счет изменения частоты вынужденных колебаний, например, режимов резания, в ряде случаев – за счет изменения частоты возбуждающей силы и применения различных дополнительных устройств – виброгасителей. Если для рабочих фаз режимов резания данная задача подобными путями может быть принципиально решена, то для процессов пуска и торможения станков ее решение пока еще не найдено. Следует учесть, что наиболее опасными данные процессы являются для массивных систем, в т.ч. для тяжелых токарных, сверлильных и фрезерных станков, а также для высокоскоростных шлифовальных станков, в частности – круглошлифовальных и плоскошлифовальных, с большими размерами кругов. Среди других объектов, для которых характерны подобные явления, следует выделить турбины, обладающие, как правило, большой инерционной массой, а также корабельные редукторы, для которых резкое изменение скоростей может осуществляться по много раз при выполнении маневров.

Учитывая большое значение всех указанных проблем для долговечности эксплуатации дорогой и высокоточной техники, их решение является важным и актуальным для современного производства.

Одной из основных задач при этом становится создание конструкций, способных уменьшить или изменить параметры колебаний и колеблющихся масс. В качестве исходных были приняты подшипники качения, служащие опорами валов и осей.

Известные подшипники качения, являются опорами для валов или осей, которые воспринимают от них радиальные, осевые и радиально-осевые нагрузки и обеспечивают их свободное вращение за счет размещения между опорой и поверхностью вращения тел качения (шариков или роликов), состоящий из наружного и внутреннего колец, между которыми размещены тела качения, удерживаемые сепаратором на определенном расстоянии один от другого по периметру окружности между кольцами [1].

Недостатком данных подшипников является невозможность компенсации переменных статических и динамических пиковых нагрузок, возникающих при пуске или торможении валов и осей, которые резко возрастают при достижении резонансного режима системы, состоящей из валов, подшипников и их опор в корпусах, либо при других видах дополнительных динамических и статических нагрузках пикового характера, что особо опасно для систем с большой массой и частотой вращения, например турбин и шпинделей станков.

Устранение указанных недостатков является главной задачей, решенной в предлагаемой работе.

*Разработка путей реализации поставленной цели.* Решение обеспечивается путем усовершенствования конструкции подшипник, в частности:

1) установки тел качения (шариков или роликов) с упором на пружины или упругие кольца с возможностью хода в гнездах или в канавках колец в направлении действия сил, создаваемых резонансными и другими пиковыми динамическими и статическими дополнительными нагрузками, возникающими в системе вал-подшипник-корпус, с ограничением величины этого хода за счет жесткости упругих элементов, которая компенсирует действие резонансных и других дополнительных динамических или статических пиковых нагрузок;

2) размещения гнезд, тел качения и пружин в наружном и внутреннем кольцах, или в сепараторе, или в упругих элементах между ними, в различных комбинациях и вариантах их конструктивных исполнений;

3) выполнения наружного и внутреннего колец полыми и упругими.

При этом повышается плавность работы системы вал-подшипник-корпус, особенно в момент ее пуска и торможения, или при других дополнительных динамических и статических нагрузках пикового характера, что улучшает условия эксплуатации изделий и повышает их долговечность.

Конструкции предлагаемых подшипников, размещенных в них тел качения и пружин, установленных в гнездах и отверстиях, выполненных в наружном и во внутреннем кольцах или в сепараторе, или между сепараторами, с полыми упругими кольцами разработаны в различных вариантах конструктивных исполнений, по которым подана заявка на изобретение [3].

В отличие от прототипа, в предлагаемых подшипниках тела качения установлены с возможностью их вращения на упругих элементах, обеспечивающих возможность смещения тел качения вместе с внутренним или наружным кольцом подшипника в направлении действия на них дополнительных сил, превышающих нормальные рабочие силы. Это позволяет исключить передачу поперечных колебаний от вала к наружному кольцу и опоре подшипника и разорвать их, как общую систему колебаний, особо опасных при достижении резонансного режима. Выполнение предлагаемых конструкций позволяет компенсировать и другие статические или динамические дополнительные (пиковые) нагрузки, возникающие в процессе пуска, работы и торможения подшипника. Размеры колец и количество размещаемых тел качения могут быть адекватными со стандартными подшипниками, в т.ч. в радиальном и радиально-упорном исполнениях.

Изготовление предлагаемых подшипников выполняется при незначительном изменении базовых технологических процессов, а установка и работа практически не отличается от работы и установки базовых. Отличия имеются лишь в размерах и в конструкции наружного и внутренних колец, или сепараторов, что облегчает их изготовление и эксплуатацию. При этом обеспечивается дополнительный положительный эффект, заключающийся в разрыве системы колебаний, в т.ч. резонансных, за счет компенсации дополнительных (пиковых) статических или динамических нагрузок, возникающих в процессе работы подшипника.

Реальные варианты исполнения предлагаемых подшипников возможны во всем диапазоне стандартных наружных или внутренних диаметров и зависят от ха-

рактера их работы. При этом привязка конструктивных параметров колец и тел качения к стандартным значениям облегчает как их выбор, так и конструирование и изготовление. Предварительный анализ показывает, что параметры новых подшипников лишь увеличиваются на один – два типоразмера, либо их нагрузочные способности снижаются в пределах возможностей одной – двух серии, однако окончательные размеры колец и толщина стенок коробчатых конструкций могут быть подобраны по результатам испытаний. Наиболее простыми в изготовлении являются подшипники с кольцами, полыми со стороны основания, т.к. их получение возможно из стандартных подшипников любых размеров при вышлифовке требуемых полостей, форма которых повторяет форму впадины кольца, а глубина полости может составлять от 1/3 до 2/3 толщины кольца, что не повышает затрат, более, чем на 50% от исходной стоимости подшипников. Разработаны технологические процессы и оснастка для выполнения данных операций. При этом технологические режимы для предлагаемых способов изготовления подшипников не отличаются от типовых режимов шлифования исходных колец, а затраты на их выполнение не превышают 50% стоимости базового подшипника, что перекрывается эффектом от улучшения их работы. По предварительным данным, наиболее эффективным является применение данных подшипников для различных турбин, шпинделей шлифовальных станков и им подобным устройств.

**Литература:** 1. Политехнический словарь /Ред. кол.: А. Ю. Ишлинский (гл. ред.) и др. –3-е изд., перераб. и доп. –М.: Советская энциклопедия,1989.-с.597. 2. Иосилевич Г.Б. Детали машин. – М.: Машиностроение, 1988. -368 с. 3. Настасенко В.А., Проценко В.А. Заявка на патент Российской Федерации № 2006104388. От 13.02.06 Подшипник качения.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Новиков Ф.В., Иванов И.Е.</b> Технологическое обеспечение точности и стабильности изготовления внутренних герметических резьб в горловинах газовых баллонов в условиях крупносерийного и массового производства .....	3
<b>Шкурупій В.Г., Новиков Ф.В.</b> Підвищення ефективності технології фінішної обробки світловідбиваючих поверхонь деталей із тонкого листа і стрічок.....	9
<b>Новиков Г.В.</b> Механика формирования упругих перемещений в технологической системе при лезвийной и абразивной обработке .....	20
<b>Новиков Ф.В., Дитиненко С.А.</b> Разработка и внедрение эффективной технологии финишной обработки твердосплавных изделий.....	25
<b>Якимов А.А.</b> Теоретические исследования термомеханических процессов в обрабатываемом материале при шлифовании торцевым прерывистым кругом .....	30
<b>Крюк А.Г., Браташевский А.Ю., Дудко П.Д.</b> Роль науки и технологий в развитии Украины .....	35
<b>Плеснецов Ю.А., Крюк А.Г.</b> Принципиально новый сортамент специальных гнутых профилей с поверхностью противоскольжения и технические условия на поставку металлопродукции .....	38
<b>Клещёв Г.М., Лисяной Г. В.</b> Информационная адаптивная модель проектирования и изготовления изделий машиностроения .....	40
<b>Макурин Н.С.</b> Формализованное описание технологического агрегата как объекта функционирования .....	44
<b>Тихенко В.Н., Волков А.А.</b> Влияние жесткости элемента компенсации по нагрузке на тяговую ошибку следящего гидропривода .....	48
<b>Якимов А.А.</b> Условия возникновения параметрического резонанса при прерывистом зубошлифовании .....	49
<b>Уминский С.М., Якимов А.А.</b> Влияние параметров станочного зацепления на точность отделки сопряженных поверхностей заготовки и инструмента ..	55
<b>Уминский С.М.</b> Влияние изменения угла скрещивания осей сопряженных поверхностей заготовки и инструмента при отделке методами свободного обката на точность и качество обработки .....	59
<b>Макаров В.Ф., Чигодаев Н.Е., Токарев Д.И.</b> Технологическое управление качеством поверхностного слоя деталей ГТД при протягивании .....	63
<b>Ларшин В.П.</b> Компьютерная технология моделирования технологической системы резьбошлифования .....	65
<b>Ларшин В.П., Лищенко Н.В.</b> Способ определения критической температуры шлифования .....	67
<b>Ларшин В.П., Якимов А.В.</b> Определение температурной погрешности шага резьбы ходовых винтов при резьбошлифовании .....	69
<b>Ларшин В.П., Ларшина А.В.</b> Оценка измерительной информации в системе компьютерной диагностики автомобилей .....	74
<b>Ларшин В.П., Рыбалко А.П.</b> Технологическая диагностика в системах ЧПУ с открытой архитектурой .....	77

<b>Чистяк В.Г.</b> Исследования качества потайных и непотайных заклепочных соединений при импульсной клепке .....	80
<b>Мощенко В.И., Лалазарова Н.А., Путятин Л.И.</b> Эффективность упрочнения твердосплавных резцов для обработки деталей из высокопрочного чугуна .....	82
<b>Карпусь В.Е., Миненко Д.А.</b> Основные положения назначения режимов резания на многоцелевых станках .....	86
<b>Фесенко А.В.</b> Особенности компоновки установки для кавитационной обработки СОЖ .....	90
<b>Краснощек Ю.С.</b> Шероховатость поверхности безвольфрамовых твердых сплавов после алмазного шлифования .....	94
<b>Мацевитый В.М., Казак И.Б., Вакуленко К.В.</b> Требования к фазовому составу защитных покрытий для режущих инструментов .....	97
<b>Ковальчук А.Н.</b> Разработка технологии окончательного шлифования ответственных деталей приводов шахтных конвейеров и твердосплавных инструментов, используемых для их механической обработки .....	99
<b>Шепелев А.А., Головкин Л.Ф., Сороченко В.Г.</b> Лазерная технология спекания алмазсодержащих композиционных материалов .....	102
<b>Новиков Ф.В., Яценко С.М.</b> Расчет температуры шлифования с учетом движения теплового источника вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали .....	105
<b>Покинтелица Н.И.</b> Перспективные конструкции инструмента для термо-фрикционной обработки плоских поверхностей заготовок .....	112
<b>Браташевський О.Ю., Горбачова Л.В., Полякова А.Г., Каплуновський В.О., Ключко О.Ю.</b> Вплив ступеня і швидкості деформації на величину внутрішньої енергії і зносостійкість сталі .....	114
<b>Морачковский О.К., Ромашов Ю.В.</b> Построение численных решений начально-краевых задач теории ползучести .....	117
<b>Андреев Ю.М., Морачковский О.К.</b> Метод подсистем для аналитического динамического анализа и синтеза .....	123
<b>Морачковский О.К., Дружинин Е.И., Ромашов Ю.В.</b> Составление дифференциальных уравнений электрических цепей на основе принципа Даламбера-Лагранжа .....	131
<b>Воробьев Ю.С., Чернобрышко М.В., Евченко Н.Ю., Толочек Е.В.</b> Оценка прочности несущих элементов строительных сооружений при детонационном воздействии .....	135
<b>Воробьев Ю.С., Чернобрышко М.В., Ярышко А.В., Степанченко Д.И.</b> Экспериментально-теоретическое исследование деформирования цилиндрической оболочки при локальном ударе .....	137
<b>Пермяков В.И., Ляшенко В.И., Рябушко А.В.</b> Адаптивная к возмущениям система управления измельчительным оборудованием по параметрам акустического шума и вибрации .....	139
<b>Пермяков В.И., Ляшенко В.И., Невкрытый А.Ю.</b> Алгоритм планирования измерений акустических и вибрационных полей в измельчительном оборудовании .....	142
<b>Угримов С.В., Шелудько Г.А., Шупиков А.Н.</b> Определение контактной	

силы при поперечном ударе по многослойной пластине .....	144
<b>Новиков С.Г., Жилина К.В., Тютюнов Д.Н., Евдокимов А.Н.</b> Вычисление функций $\exp(x)$ и $\exp(-x)$ методом $\Delta$ -приближений .....	146
<b>Довгаль В.М., Малыхин В.В. Тютюнов Д.Н., Евдокимов А.Н., Овсянников О.И.</b> Вычисление гиперболических функций $\operatorname{sh}(x)$ , $\operatorname{ch}(x)$ методом $\Delta$ -приближений .....	149
<b>Кантор Б.Я., Ржевская И.Е.</b> Свободные гидроупругие колебания лопастей рабочих колес поворотного-лопастных гидротурбин .....	151
<b>Милешкин М.Б., Библик И.В.</b> Новый подход к суммированию усталостных повреждений .....	153
<b>Милешкин М.Б., Библик И.В., Стоев П.И.</b> Применение компьютерного моделирования для анализа амплитудного распределения сигналов акустической эмиссии .....	155
<b>Сметанкина Н.В., Свет Е.В., Шупиков А.Н.</b> Анализ температурных полей в многослойных пластинах неканонической формы .....	157
<b>Воробьев Ю.С., Приймаков Г.А.</b> Критериальная оценка вибростойкости силовых волновых зубчатых передач .....	159
<b>Воробьев Ю.С., Стороженко М.А.</b> Влияние повреждений турбинных лопаток на их частоты колебаний и вибрационные напряжения .....	161
<b>Воробьев Ю.С., Жондковски Р., Гошкодеря В.П., Романенко В.Н.</b> Влияние особенностей заземления элементов Т-образного хвостовика на частоты собственных форм колебаний лопатки .....	163
<b>Шатохин В.М., Зайцев А.И., Шаповалов А.В.</b> Диагностика технического состояния цилиндрических поршневых пар насоса гидрообъемной передачи с шариковыми поршнями .....	167
<b>Шатохин В. М., Зайцев А. И., Кутовая О. В.</b> Синтез параметров привода распределительного вала топливного насоса двигателя 470-1М .....	172
<b>Гапонов В.С., Музыкин Ю.Д., Столбовой А.С., Татьков В.В., Вышнинецкий С.М., Телюк Д.В.</b> Исследование режимов нагружения силового редуктора чистой клетки непрерывного тонколистового стана горячей прокатки «1680» .....	178
<b>Гапонов В.С., Столбовой А.С., Музыкин Ю.Д., Татьков В.В., Вышнинецкий С.М., Телюк Д.В.</b> Оценка остаточного ресурса работы зубчатых передач прокатного оборудования .....	181
<b>Ушаков М.Н., Воробьев Ю.С.</b> Контроль технического состояния зубозацепления шаровой мельницы .....	184
<b>Воинов А. П., Воинова С. А.</b> Особенности управления двухступенчатой котельной топкой с низкотемпературным кипящим слоем .....	186
<b>Воінова С. О.</b> Взаємозв'язок екологічної й економічної ефективності технічних об'єктів .....	188
<b>Ерошин С. С., Третьяк А.Е.</b> Повышение эффективности резки слитков Si на пластины за счёт активного контроля с помощью микропроцессорных систем. .....	191
<b>Ерошин С.С., Брешев В.Е.</b> Параметрический синтез рабочих органов без механических опор для повышения технического уровня машин с прямым приводом .....	193
<b>Пашкова Г.И.</b> Об упрочнении крупных коленчатых валов поверхностным	

пластическим деформированием .....	196
<b>Чуйкова Е.В.</b> О влиянии горячего изостатического прессования на свойства сплава АЛ-25, закристаллизованного под давлением. ....	199
<b>Олейник А.К.</b> Влияние ультра дисперсных окислов на характеристики трения деталей двигателей .....	201
<b>Аксьонова С.І., Грязева Г.В., Каракуркчі Д.А.</b> Використання оптико-електронних систем для дистанційного зондування радіоактивного забруднення атмосфери .....	203
<b>Каракуркчі Д.А.</b> Методи покращення робочих характеристик п'езосорбційних датчиків хімічних речовин .....	206
<b>Разиньков Н. А.</b> Технология изготовления лопастей шнеков комплекса «УД-БШК2ДМ» .....	208
<b>Проволоцкий А.Е., Негруб С.Л.</b> Разработка способа финишной обработки деталей после электрофизических методов обработки .....	210
<b>Симсон Э.А., Назаренко С.А., Белозеров А.В., Марусенко С.И.</b> Анализ чувствительности плат компьютеров при динамических воздействиях .....	212
<b>Симсон Э.А., Назаренко С.А., Зюзин А.Ю., Любецкая В.Б.</b> Анализ чувствительности динамических характеристик пьезоэлектрических приборов. ....	216
<b>Степанов М.С.</b> Повышение функциональных действий СОЖ при шлифовании .....	219
<b>Петков А.А.</b> Параметрический синтез высоковольтных импульсных испытательных устройств .....	224
<b>Волосухин В.А., Новиков С.Г., Чижов А.Е., Чижов Е.А.</b> Быстровозводимые гибкие гидротехнические сооружения для защиты территорий от затопления и подтопления .....	227
<b>Журавлева Е.В., Студеникина Л.И.</b> Компьютерные технологии в организации самостоятельной работы студентов инженерных специальностей .....	230
<b>Журавлева Е.В., Студеникина Л.И.</b> Преподавание математических дисциплин студентам технических специальностей с использованием компьютерных технологий .....	233
<b>Смирнова Г.А.</b> Социологические аспекты модели профессионально-трудовой социализированности личности будущего специалиста средних специальных учебных заведений .....	236
<b>Бузько С.В., Золотарев В.В., Карпушенко В.П., Науменко А.А.</b> Математическая модель электрической напряженности изолированных жил силовых кабелей .....	239
<b>Золотарев В.М.</b> Оценка электрической напряженности токопроводящей жилы в ионизированном газе .....	241
<b>Мальцева А.А.</b> Учет типа кредитной политики при выборе формы оплаты за продукцию .....	245
<b>Соколова М.В.</b> Система поддержки принятия управленческих решений в социально-экологической сфере региона .....	248
<b>Мищенко А.Н.</b> Современные подходы к внедрению механизма управления качеством продукции .....	251
<b>Тимофеев Д.В.</b> Предпосылки оценки конкурентоспособности техники по стадиям ее жизненного цикла .....	253

<b>Мартиненко В.Я., Федишин Б.П.</b> Інноваційна модель розвитку держави ...	256
<b>Мартиненко В.Я., Федишин Б.П. Стойко І.І., Дудкін П.Д.</b> Регіональна інноваційна політика в умовах структурної перебудови економіки .....	259
<b>Тимофеев В.Н.</b> Методические подходы к прогнозированию процессов реализации новой техники .....	262
<b>Волков И.В., Николаенко А.П.</b> Вибрационная обработка и ее возможности.	266
<b>Ерошин С.С., Таращанский М.Т.</b> Влияние осевой жесткости АКВР на неплоскостность отрезаемых пластин .....	268
<b>Терентьев А. Ю.</b> Экономическая эффективность процесса резания .....	270
<b>Настасенко В.А., Урсал К.Г.</b> Разработка нового вида торцовых фрез и шаберов с тангенциальным креплением пластин .....	274
<b>Настасенко В.А., Проценко В.А.</b> Подшипники качения, уменьшающий резонанс при пуске и торможении машин .....	276
<b>Содержание</b> .....	280

© Харьковская научно-производственная  
корпорация «ФЭД», 2006

## **Научное издание**

**Труды 12-й Международной научно-технической конференции**

**Физические и компьютерные технологии**

**7-8 июня 2006 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 31.05.2006 г. Формат 60x88/8.  
Бумага офсетная. Усл.-печ. л. 17,5. Уч.-изл. л. 17,0  
Тираж 300. Заказ №

Отпечатано в типографии завода «ФЭД». 61023, г. Харьков, ул. Сумская, 132