

*11 - я Международная научно-
техническая конференция*

**ФИЗИЧЕСКИЕ И КОМПЬЮ-
ТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

*2 – 3 июня
2005 г*

г. Харьков

Харьковский национальный экономический университет
Главное управление промышленности, транспорта и связи
Харьковской областной государственной администрации
Харьковская научно-производственная корпорация "ФЭД"
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 радиозлектроники
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
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 11-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО- ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

"ФИЗИЧЕСКИЕ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

**INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND
TECHNICAL CONFERENCE**

Харьков 2005

УДК 62-65: 621.382.82

Физические и компьютерные технологии.

Труды 11-й Международной научно-технической конференции, 2-3 июня 2005г. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2005. – 386 с.

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

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

КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ ПО ПРОВЕДЕНИЮ КОНФЕРЕНЦИИ:

Сопредседатели:

Якимов А.В., д.т.н.	(Одесса)	Коломиец В.В., д.т.н.	(Харьков)
Новиков Ф.В., д.т.н.	(Харьков)	Крюк А.Г., к.т.н.	(Харьков)
Гринева В.Н., д.э.н.	(Харьков)	Ларшин В.П., д.т.н.	(Одесса)
Ефремов В.А.	(Харьков)	Мальхин В.В., к.т.н.	(Курск)
Кривошапка Ю.Н., к.э.н.	(Харьков)	Мовшович А.Я., д.т.н.	(Харьков)
		Морачковский О.К., д.т.н.	(Харьков)

Члены совета:

Фадеев В.А., к.т.н.	(Харьков)	Невлюдов И.Ш., д.т.н.	(Харьков)
Дудко П.Д., к.т.н.	(Харьков)	Новиков Г.В., к.т.н.	(Харьков)
Ткаченко В.П., к.т.н.	(Харьков)	Шепелев А.А., д.т.н.	(Киев)
Ковальчук А.Н.	(Харьков)	Шкурупий В.Г.	(Харьков)
		Шкурупий Ю.В.	(Харьков)
		Ямников А.С., д.т.н.	(Тула)

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ:

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

Труды воспроизводятся непосредственно с авторских оригиналов.

ПОЗДРАВЛЕНИЕ



Наша очередная 11-я Международная научно-техническая конференция «Физические и компьютерные технологии» посвящается 80-летию со дня рождения основателя и руководителя конференции, выдающегося ученого-технолога, Заслуженного деятеля науки Украины, лауреата Государственной премии Украины, почетного профессора НТУУ «Киевский политехнический институт», доктора технических наук, профессора кафедры «Технология машиностроения» Одесского Национального политехнического университета Якимова Александра Васильевича, который внес большой вклад в развитие научных основ технологии машиностроения, процессов механической и физико-технической обработки материалов. Под его руководством успешно решен ряд принципиально важных для отечественного машиностроения проблем по повышению качества обработки ответственных деталей ма-

шин особенно авиационного назначения. Им впервые в мировой практике создан чрезвычайно эффективный процесс прерывистого шлифования, который кардинальным образом решает проблему снижения температуры в зоне резания и улучшения качества поверхностного слоя обрабатываемого материала, повышает надежность и долговечность работы деталей машин.

Александр Васильевич – автор более чем четырехсот научных трудов, из них около полусотни монографий, учебников, учебных пособий. Он является научным руководителем 10-ти томного коллективного издания «Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения», выполненного в рамках нашей конференции с участием ведущих ученых-технологов Украины и России.

Александр Васильевич подготовил целую плеяду кандидатов и докторов технических наук. Он является Учителем и кумиром для многих и многих специалистов. Это была именно его идея провести в таком мощном индустриальном городе как Харьков на базе машиностроительных предприятий серию научно-технических конференций с целью приблизить науку к производству, активизировать работы по созданию и внедрению новых научных разработок. Сегодня мы проводим 11-ую по счету конференцию. И в этом огромная заслуга Александра Васильевича.

От всей души поздравляем дорогого Александра Васильевича с юбилеем, желаем больших творческих успехов в научной работе, крепкого здоровья, счастья, долгих лет жизни и столь же активного и плодотворного участия в организации и проведении наших конференций.

Оргкомитет конференции

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

УДК 621.923

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС РАБОТ ПРИ ПРЕРЫВИСТОМ ШЛИФОВАНИИ

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

In work results theoretical and the experimental researches of shares of energy spent on cutting and friction in the general power balance of processes of usual continuous and faltering grinding are resulted.

Прерывистое шлифование широко применяется в машиностроении. В многочисленных работах [1, 2, 3] раскрыта его физическая сущность и определены технологические возможности. В данной работе проводится его анализ с учетом соотношения работ, которые затрачиваются на резание и трение в общем энергетическом балансе процесса шлифования. Для решения данной задачи важно знать коэффициент “чистого резания” $K_{ш.рез}$ (аналогичный коэффициенту шлифования) $K_{ш}$, коэффициент трения f круга с обрабатываемым материалом, тангенциальную составляющую силы резания $P_{z.рез}$, которые определяются зависимостями [4]:

$$K_{ш.рез} = \sqrt{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot \frac{K_{ш}}{\sigma}}, \quad f = K_{ш} - K_{ш.рез},$$
$$P_{z.рез} = K_{ш.рез} \cdot P_y, \quad P_{z.тр} = P_z - P_{z.рез},$$

где $\sigma_{сж}$ - предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²; σ - условное напряжение резания при шлифовании, Н/м²; P_z , P_y - соответственно тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н; $P_{z.рез}$, $P_{z.тр}$ - составляющие силы P_z , обусловленные процессами резания и трения при шлифовании, Н.

Доля трения в общем энергетическом балансе процесса шлифования равна отношению $f / K_{ш}$. Зная параметр $K_{ш.рез}$, можно определить безразмерный коэффициент η , учитывающий степень затупления зерен круга и изменяющийся в пределах 0...1 ($\eta \rightarrow 0$ – для острых зерен, $\eta \rightarrow 1$ – для затупленных зерен):

$$\eta = 1 - \frac{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot HV \cdot \lambda}{2 \cdot V_{кр}}, \quad (3)$$

где HV - твердость обрабатываемого материала (по Виккерсу), Н/м²; 2γ - угол при вершине конусообразного режущего зерна; λ – удельная интенсивность шлифования, м³/(с·Н).

Режущую способность обычных и прерывистых шлифовальных кругов оценивали удельной интенсивностью шлифования λ [мм³/(с·Н)], массой снятого материала единицей площади рабочей поверхности шлифовального круга в единицу времени K_p [г/(с·см²)] и отношением тангенциальной составляющей силы резания P_z к радиальной составляющей силы резания P_y , т.е. P_z / P_y . Зависимости параметров, которые характеризуют режущую способность обычных и прерывистых кругов

($l_1=36$ мм, $l_2=24$ мм) от времени шлифования стали 18ХНВА на режиме: $V_{кр}=34,5$ м/с; $V_{дем}=0,1$ м/с; $P_y=12$ Н/мм, показаны на рис. 1.

По мере затупления режущих зерен на рабочей поверхности сплошного круга коэффициент λ и отношение составляющих силы резания P_z/P_y уменьшаются. Например, при шлифовании сплошным кругом после его правки отношение $P_z/P_y=0,78$, а при шлифовании прерывистым кругом $P_z/P_y=0,7$.

После 25 минут работы обычного сплошного круга отношение P_z/P_y уменьшилось до 0,3, а прерывистого круга – до 0,64. Удельная интенсивность шлифования λ прерывистым кругом уменьшилась от 0,5

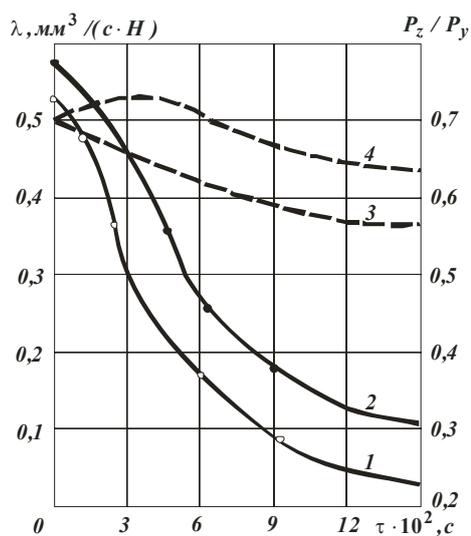


Рис. 1. Зависимости параметров λ и P_z/P_y от времени шлифования τ сплошным и прерывистым кругами 24А 25 НСМ26К5: 1; 3 – изменение коэффициента λ ; 2; 4 – изменение отношения P_z/P_y (контурные линии – сплошной круг, пунктирные линии – прерывистый круг).

до 0,35 мм³/(с·Н), а сплошным кругом – от 0,55 до 0,05 мм³/(с·Н). Приведенные экспериментальные данные показывают, что обычные круги в связи с затуплением зерен и заполнением пор продуктами обработки за 25 минут работы теряют свою режущую способность. Так, коэффициент λ при шлифовании сплошным кругом уменьшился в 11 раз, коэффициент K_p – в 23 раза, а отношение P_z/P_y – в 2,6 раза.

Сохранение высокой режущей способности прерывистого круга на протяжении длительного периода времени связано с возникновением в упругой системе шпиндельного узла станка вынужденных высокочастотных колебаний с частотой приблизительно равной 300...1000 Гц, которые существенно изменяют условия трения и износа зерен, снижают сопротивление схода стружки, облегчают процесс ее образования и исключают налипание материала на режущие зерна. Кроме того, наличие вырезов на шлифовальном круге, наклоненных к оси вращения или радиальных пазов на торце, способствуют подаче в зону резания воздушного потока с повышенным давлением.

Мощный поток воздуха выдувает образующуюся стружку из зоны резания, интенсифицирует процесс ее окисления и сгорания. Окисленная стружка становится более хрупкой, шарообразной, не налипает на поверхность режущих зерен и не проникает в поры круга. Наличие вырезов на круге с прерывистой рабочей поверхностью увеличивает расстояние между режущими зернами и глубину их проникновения в обрабатываемый материал.

Известно, что при небольших глубинах микрорезания увеличивается часть энергии, которая затрачивается на трение, и уменьшается работа, затрачиваемая на разрушение обрабатываемого материала. Процесс деформации и разрушения материала при разрушении зависит от радиуса округления режущих кромок зерен, угла при вершине и физических свойств обрабатываемого материала. Увеличение радиусов округления зерен по мере их износа смещает точку начала стружкообразования

в область больших глубин микрорезания.

При шлифовании кругами с прерывистой рабочей поверхностью нагрузки, действующие на режущие зерна, распределяются равномерно. Длительное время сохраняется высокая режущая способность, в то время как обычные сплошные круги теряют свою режущую способность и требуют правки. При прерывистом шлифовании вследствие динамических ударов происходит хрупкое разрушение затупленных зерен с образованием новых режущих кромок. На основе экспериментальных данных (рис. 1) рассчитаны параметры $K_{ш.рез}$, f , $f/K_{ш}$ и η при $\sigma_{сж}=100$ кГс/мм²; $HV=512$ кГс/мм², $2\gamma=120^\circ$, табл. 1.

Таблица 1

Время шлифования τ , мин	$K_{ш.рез}$		f		$f/K_{ш},\%$		η	
	Круг сплошной	Круг прерывистый						
0	0,177	0,169	0,400	0,331	69,0	66,2	0,783	0,800
3	0,126	0,164	0,354	0,356	73,7	68,4	0,888	0,812
6	0,100	0,157	0,170	0,343	65,4	68,6	0,931	0,828
9	0,075	0,150	0,100	0,320	55,5	66,6	0,956	0,845
12	0,058	0,147	0,055	0,300	42,3	66,6	0,975	0,851
15	0,048	0,141	0,052	0,290	17,3	66,0	0,982	0,861

Из приведенных в табл. 1 расчетных данных вытекает, что с течением времени шлифования параметр $K_{ш.рез}$ уменьшается как для сплошного, так и прерывистого кругов. Однако интенсивность уменьшения параметра $K_{ш.рез}$ различна. Для сплошного круга параметр $K_{ш.рез}$ уменьшается более чем в 3 раза по сравнению с прерывистым кругом. Эти данные свидетельствуют о высокой режущей способности прерывистого круга, которые он сохраняет в течении длительного периода времени обработки.

При прерывистом шлифовании доля энергии, которая затрачивается на трение $f/K_{ш}$, стабильна во времени и равна приблизительно 66%. При шлифовании сплошным кругом доля энергии, затрачиваемая на трение, уменьшается до 17%. Однако, из этого не вытекает, что увеличивается доля энергии, которая затрачивается на резание и соответственно съем материала. В этом случае происходит перераспределение энергии резания и трения в условиях резкого снижения производительности обработки и перехода от трения обрабатываемого материала преимущественно со связкой круга до трения обрабатываемого материала с режущими зернами.

Представляет интерес анализ закономерностей изменения безразмерного параметра η . При прерывистом шлифовании безразмерный параметр η увеличивается существенно – от 0,8 до 0,861. При шлифовании сплошным кругом он изменяется от 0,783 до 0,982. Значительное затупление зерен круга приводит к уменьшению производительности обработки в 10 раз. Как следует из рис. 1, после правки круга $\lambda=0,55$ мм³/(с·Н), а после 25 мин шлифования $\lambda=0,05$ мм³/(с·Н).

В табл. 2 приведены расчетные значения параметров $K_{ш.рез}$, f и $f/K_{ш}$ при шлифовании стали 12Х2Н4А сплошным и прерывистым кругом после правки ($\tau=0$) и после 10 мин работы ($\tau=6 \cdot 10^2$ с).

Коэффициент шлифования $K_{ш}=P_z/P_y$ для прерывистого круга меньше, чем

для сплошного круга, однако параметр $K_{ш.рез}$, который характеризует производительность обработки, наоборот, значительно больше, чем для сплошного круга. Коэффициент трения f для прерывистого круга в течении 10 мин шлифования практически не изменяется. В то же время для сплошного круга он уменьшается почти в 2 раза. Доля энергии, затрачиваемая на трение, $f / K_{ш}$ при шлифовании прерывистым кругом остается постоянной.

Таблица 2

Вид шлифования	$\sigma \cdot 10^3$, кГс/мм ²		$K_{ш}$		$K_{ш.рез}$		f		$f / K_{ш}, \%$	
	0	$6 \cdot 10^2$, с	0	$6 \cdot 10^2$, с	0	$6 \cdot 10^2$, с	0	$6 \cdot 10^2$, с	0	$6 \cdot 10^2$, с
Сплошным кругом без СОЖ	12,5	22,2	0,85	0,55	0,217	0,131	0,633	0,419	74,4	76,1
Прерывистым кругом без СОЖ	9,5	10,2	0,7	0,65	0,227	0,211	0,473	0,439	67,5	67,5
Сплошным кругом, пропитанным серой	10,8	14,0	0,85	0,55	0,234	0,165	0,616	0,385	72,4	70,0
Прерывистым кругом, пропитанным серой	7,0	8,0	0,7	0,65	0,265	0,238	0,435	0,412	62,1	63,3

После пропитки круга серой уменьшаются энергетические затраты на трение и увеличивается параметр $K_{ш.рез}$. Безразмерный параметр η при шлифовании прерывистым кругом меньше, чем при шлифовании сплошным кругом, и остается неизменным во времени. При шлифовании сплошным кругом 24А 25 НСМ26К5 стали Х12М на режиме: $V_{кр} = 25$ м/с; $V_{дет} = 10$ м/мин ($HV = 500$ кГс/мм²; $tg\gamma = 1,732$) безразмерный параметр η непрерывно увеличивается, табл. 3.

Приведенные в табл. 3 данные свидетельствуют о том, что прерывистый круг работает в режиме самозатачивания и имеет более острые режущие кромки, чем сплошной круг. Кроме того, процесс прерывистого шлифования происходит с большими толщинами срезов, что обеспечивает более высокую производительность обработки.

Таблица 3

Время шлифования τ , мин	λ , мм ³ /(мин·кГс)		η	
	Круг сплошной	Круг прерывистый	Круг сплошной	Круг прерывистый
0	350	450	0,682	0,591
5	250	450	0,773	0,593
10	200	430	0,818	0,595
15	160	440	0,854	0,600
20	155	430	0,859	0,600

Литература: 1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с. 2. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с. 3. Якимов А.В. Прерывистое шлифование. – К.: Вища школа, 1986. – 175 с. 4. Якимов О.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якимов О.О. Високопродуктивне шліфування: Навч. посібник. – К.: ІСДО, 1995. – 180 с.

ФИНИШНАЯ ОБРАБОТКА ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ИЗДЕЛИЙ АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СВЯЗКАХ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, Дитиненко С.А., Ковальчук А.Н.

(г. Харьков, Украина)

The effective technology is offered and results of theoretical researches of precision processing of products from a firm alloy are resulted by diamond circles.

Алмазное шлифование широко используется для обработки твердосплавных изделий. Вместе с тем, вопросы повышения производительности и качества обработки при алмазном шлифовании не утратили своей актуальности и в настоящее время. В особенности это относится к операциям круглого наружного шлифования. Для определения путей повышения производительности Q и снижения шероховатости R_a обработки нами получена аналитическая зависимость, увязывающая эти оба параметра [1, 2]:

$$Q = B \cdot V_{дет} \cdot t = \frac{m \cdot B \cdot V_{кр} \cdot t}{\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot \sqrt{\rho}} \cdot \frac{(1 + \eta)}{(1 - \eta)^2} \cdot \left(\frac{R_a}{2} \right)^{2,5}, \quad (1)$$

где m - объемная концентрация зерен круга; \bar{X} - зернистость круга, м; B - ширина круга, м; $V_{кр}, V_{дет}$ - соответственно скорости круга и детали, м/с; t - глубина шлифования, м; $\rho = \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}}$; $R_{кр}, R_{дет}$ - соответственно радиусы круга и детали, м;

$\eta = \frac{x}{H} = \frac{x}{x + H_{max}}$ - безразмерный коэффициент, учитывающий степень затупления

зерен круга и изменяющийся в пределах $0 \dots 1$ ($\eta \rightarrow 0$ - для острых зерен, $\eta \rightarrow 1$ - для затупленных зерен); x - величина линейного износа максимально выступающего над связкой зерна, м; H - условная максимальная глубина внедрения зерен в обрабатываемый материал, отсчитывается от вершины исходного неизношенного максимально выступающего над уровнем связки зерна, м; H_{max} - максимальная (приведенная) толщина среза, м;

$$H_{max} = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр}} \cdot \frac{(1 - \eta)^2}{(1 + \eta)}}. \quad (2)$$

Как следует из зависимости (1), наибольшее влияние на производительность обработки Q оказывает безразмерный коэффициент η . С его увеличением $\eta \rightarrow 1$ производительность обработки неограниченно увеличивается. Выполнить условие $\eta \rightarrow 1$ можно за счет существенного увеличения величины $x \rightarrow H$ (или $H_{max} \rightarrow 0$), т.е. искусственно создавая на вершинах зерен значительные площадки и обеспечивая при этом процесс резания (съем материала).

Очевидно, создать значительные площадки на вершинах зерен алмазных кругов на относительно мягких связках (органических, керамических) не представляется возможным вследствие низкой прочности удержания зерен в связке. Их можно создать на вершинах зерен алмазных кругов на металлических связках, предварительно обеспечив увеличенное выступание зерен над уровнем связки круга за счет применения эффективных методов электроэрозионной или электрохимической правки.

Для разрушения выступающей над уровнем связки части алмазного зерна и образование площадки можно использовать метод шлифования алмазным кругом на металлической связке изделия из сверхтвёрдого материала, например, алмазного карандаша, пластины из поликристаллического синтетического сверхтвёрдого материала и т.д. [3].

Для проверки теоретических положений были проведены экспериментальные исследования на операции круглого наружного шлифования твердосплавных изделий. Алмазный круг на металлической связке 1А1 300х20х5 АС6 100/80 М1-01 4 предварительно подвергался электроэрозионной правке с целью устранения его биения и качественного вскрытия алмазоносного слоя (обеспечения увеличенного выступания зерен над уровнем связки). Затем производилось шлифование по жесткой схеме алмазным кругом алмазного карандаша, который крепился в специально предназначенном для этого устройстве на круглошлифовальном станке. Глубина шлифования составляла 0,02 мм, выполнялось несколько продольных ходов стола станка.

Подготовленный таким способом алмазный круг на металлической связке был использован для круглого наружного шлифования твердосплавных изделий. В ходе испытаний установлено, что шероховатость обработки равна $R_a=0,1$ мкм, тогда как после шлифования вновь заправленным электроэрозионным методом этим же алмазным кругом шероховатость обработки находилась на уровне $R_a=2$ мкм (приработка круга в течении 30 мин позволила уменьшить шероховатость лишь до уровня $R_a=1$ мкм).

Как видим, шлифование специально подготовленным к работе алмазным кругом на металлической связке позволяет существенно снизить шероховатость обработки. При этом алмазный круг обеспечивает достаточно производительный съём обрабатываемого материала (глубина шлифования $t=0,02...0,05$ мм) в течении длительного периода времени шлифования (30 мин и более).

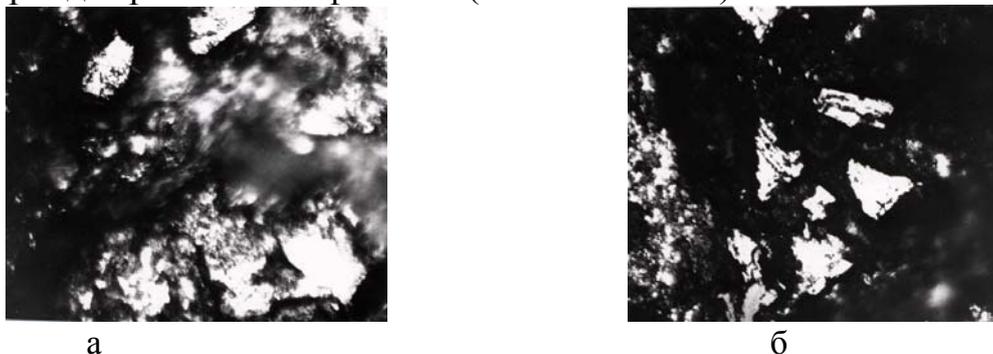


Рис.1. Рабочая поверхность алмазного круга 1А1 300х20х5 АС6 100/80 М1-01 4 (светлые участки на фотографиях – алмазные зерна).



Рис.2. Рабочая поверхность алмазного правящего карандаша (темные участки на фотографии а – алмазные зерна; на фотографии б показано алмазное зерно в увеличенном масштабе).

Было проведено сравнение расчетных и экспериментальных значений размеров площадок на вершинах зерен. Расхождение составило всего 10%. Максимальный диаметр площадки на зерне составляет 30...40 мкм (рис. 1, а, б), что равно примерно третьей части его размера. На рис.2, а, б показаны фотографии рабочей поверхности алмазного карандаша (с хаотическим расположением зерен) после его шлифования алмазным кругом.

На основе теоретических и экспериментальных исследований разработан эффективный технологический процесс прецизионной обработки цилиндрических твердосплавных поверхностей, включающий предварительную электроэрозионную правку и специальную технологию подготовки алмазного круга на металлической связке к работе (создание площадок на вершинах алмазных зерен). Процесс 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 технологический процесс внедрен на Харьковском машиностроительном заводе “ФЭД” при прецизионной обработке ответственных твердосплавных изделий.

Литература: 1. 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. 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. 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.

УДК 621.9.011

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ГЛУБИНЫ ДЕФЕКТНОГО СЛОЯ ПРИ РЕЗЬБОШЛИФОВАНИИ

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

Definition techniques of the grinding temperature and defect layer depth which can be used in diagnostical system development according to temperature criteria are given.

Передачи винт-гайка качения (ВГК) находят широкое применение в станкостроении, авиации, атомной и военной технике. Высокая кинематическая точность, плавность хода, малый момент трения, отсутствие зазоров при реверсировании направления движения, высокий к.п.д. — все это предопределило высокую потребность станкостроения и других отраслей промышленности Украины в этих передачах. Детали передач имеют высокую трудоемкость изготовления, которая обусловлена трудностями обеспечения требуемых точности размеров деталей и физико-механического состояния их поверхностного слоя. Параметры точности и качества обрабатываемой поверхности резьбы обеспечиваются на операциях резьбошлифо-

вания и оказывают непосредственное влияние на эксплуатационные свойства машин, в которых эти детали используются.

Известно, что достижение наибольшей производительности в производстве передач ВГК возможно за счет внедрения современных методов труда и прежде всего автоматизированных и автоматических [1]. При разработке технологических предпосылок и систем для автоматизированного или автоматического управления процессами механической обработки конечной целью является увеличение производительности обработки при одновременном обеспечении высокого качества продукции. Перспективным направлением развития технических систем вообще и технологических систем в частности является постоянный надзор за работой машин в реальных условиях, систематический сбор статистической информации о надежности конструкции, их элементов и узлов. Существует несколько этапов обеспечения качества продукции: качество процесса проектирования (достоверность расчетных гипотез и качество проектной документации); качество в процессе производства (отсутствие технологических дефектов, вызванных механической обработкой, операциями сборки, транспортировки и т.д.); совершенствование методов технической диагностики и контроля качества материалов и конструкций в условиях изготовления и эксплуатации; сохранение качества после изготовления и испытаний [1].

Технологические системы механической обработки деталей машин представляют собой обширный класс технических систем качество и надёжность функционирования которых определяют эффективность механической обработки. В состав этих систем входят: металлорежущий станок, приспособление, инструмент и заготовка. Одной из наиболее распространённых разновидностей указанных технологических систем являются технологические системы шлифования и, в частности, резьбошлифования, которые являются слабым звеном с точки зрения информационного обеспечения производственного процесса в общезаводской системе обеспечения качества производства передач ВГК.

Многочисленные исследования, проведенные в подшипниковой, авиационной, автомобильной промышленности и других отраслях машиностроения показали, что возникающие в процессе шлифования прижоги существенно (иногда в десятки раз) снижают контактную и циклическую прочность деталей. Например, шлифовочные прижоги, распространяющиеся на глубину 95-100 мкм и вызывающие уменьшение твердости поверхности цементируемого слоя стали 12Х2Н4А с HRC 60-62 до HRC 51, снижают долговечность зубчатых колес примерно в 8 раз, а предел контактной прочности в 1,25 раза. Наличие шлифовочных прижогов, например, на боковых поверхностях зубьев шестерен снижает их долговечность в 5-8 раз, прижоги на беговых дорожках колец подшипников качения — в 2-3 раза. Стойкость вырубных штампов, имеющих прижоги на режущих кромках матриц и пуансонов, снижается в 20-30 раз [2, 3]. Поэтому обеспечение бесприжогового шлифования деталей машин является актуальной задачей в технологии машиностроения. Это в полной мере относится к шлифованию резьбы ходовых винтов передач ВГК.

Известно, что прижоги при шлифовании возникают при высокой температуре в зоне резания, когда уровень возникающей температуры превышает пороговое (критическое) значение. Для определения температуры шлифования используют экспериментальные и теоретические методы оценки теплонапряженности процесса. Анализ литературных источников показывает, что наиболее часто рассматриваются теплофизические модели температурного поля. Многочисленными исследованиями

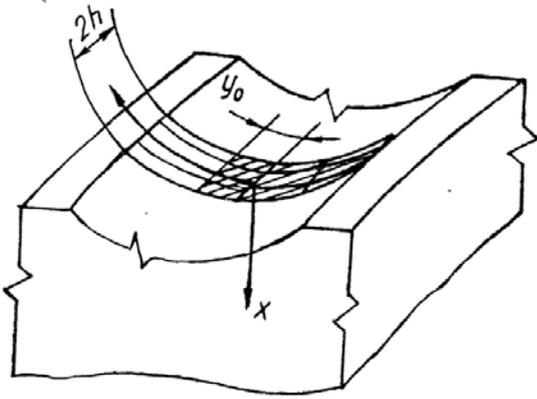


Рис.1. Тепловая схема при шлифовании резьбы полукруглого профиля.

установлено, что температура в любой точке пространства и в любой момент времени линейно зависит от плотности теплового потока q , если величина q постоянна во всех точках контакта шлифовального круга и обрабатываемой заготовки [2-4]. Такие условия характерны для схем плоского и круглого шлифования, которые наиболее распространены в промышленности. В то же время при шлифовании резьбы полукруглого профиля пятно контакта между шлифовальным кругом и заготовкой имеет явно выраженную криволинейную форму (рис.1). Установлено [4], что эта кривизна оказывает существенное влияние на температуру шлифования (при прочих равных условиях). Поэтому уравнение, описывающее температурное поле, должно учитывать кривизну обрабатываемого профиля.

В качестве такого уравнения для указанных условий можно использовать следующее решение одномерного дифференциального уравнения теплопроводности с граничными условиями второго рода [4]

$$T(r, \tau) = -\frac{2qR}{\pi\lambda} \cdot \int_0^{\infty} \left(1 - \exp\left(-\frac{a \cdot \tau}{R^2} \zeta^2\right) \right) \cdot \frac{J_0\left(\zeta \frac{r}{R}\right) Y_1(\zeta) - Y_0\left(\zeta \frac{r}{R}\right) J_1(\zeta)}{\zeta^2 (J_1^2(\zeta) + Y_1^2(\zeta))} d\zeta, \quad (1)$$

где $r = R + x$ - текущий радиус-вектор рассматриваемой точки, м; R - радиус граничной цилиндрической поверхности, м; x - координата; q - плотность теплового потока, Вт/м²; τ - время действия теплового источника, с; a, λ - температуро-, м²/с, и теплопроводность обрабатываемого материала, Вт/м·°С; J_0, J_1 - функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка; Y_0, Y_1 - функции Бесселя второго рода нулевого и первого порядка; ζ - переменная интегрирования.

Здесь время действия теплового источника определяют по следующей формуле

$$\tau = \frac{\sqrt{\frac{D \cdot d}{D + d}} \cdot t}{V}, \quad (2)$$

где D, d - диаметры шлифовального круга и детали, м, соответственно; t - глубина шлифования, м; V - скорость заготовки, м/с.

Уравнение (1) справедливо в интервале времени $0 \leq \tau \leq \infty$ и в обобщенной форме может быть представлено в виде

$$T = T\left(x, \frac{a \cdot \tau}{R^2}\right).$$

Здесь T - температура шлифования, зависящая от координаты x и критерия Фурье $F_0 = \frac{a \cdot \tau}{R^2}$.

Тепловой источник при шлифовании действует в ограниченном интервале вре-

мени $0 \leq \tau \leq \tau_m$, где τ_m - максимальное время действия теплового источника. Для определения температурного поля внутри и за пределами этого интервала можно использовать метод суперпозиции, заключающийся в суммировании температурных полей от действия двух тепловых источников (с положительной и отрицательной плотностью теплового потока). Т.е. результирующее температурное поле будет описываться уравнением

$$T = T\left(\frac{a \cdot \tau_m}{R^2}\right) - T\left(\frac{a \cdot (\tau - \tau_m)}{R^2}\right). \quad (3)$$

Для исследования температурного поля, описываемого уравнением (3), выполнены расчеты температуры шлифования по этому уравнению для фиксированных координат x и времени τ (рис.2). Расчёты выполнены с помощью программы MathCAD при следующих исходных данных: $a = 8,4 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda = 40$ Вт/м·°С; $R = 3 \cdot 10^{-3}$ м.

Из анализа графиков на рис. 2. видно, что величина максимальной температуры практически не зависит от глубины x и имеет место при максимальном времени воздействия теплового источника $\tau = \tau_{max}$. Поэтому в качестве уравнения для расчета глубины дефектного слоя можно использовать уравнение (1). В то же время уравнение (3) позволяет исследовать скорость охлаждения по глубине поверхностного слоя (спадающая ветвь кривой на рис.2, б, в, г) и тем самым прогнозировать изменения микротвердости материала по глубине поверхностного слоя.

Характер изменения температуры во времени меняется в зависимости от глубины x (рис.2, б, в, г). В крайних точках (на поверхности $x=0$ и на глубине $x=1500$ мкм) характер ветвей кривой меняется на противоположный: (выпуклость изменяется на вогнутость при возрастании температуры, а вогнутость — на выпуклость при уменьшении температуры).

Плотность теплового потока определяется мощностью шлифования P и площадью пятна контакта между кругом и изделием S

$$q = \frac{P}{S}. \quad (4)$$

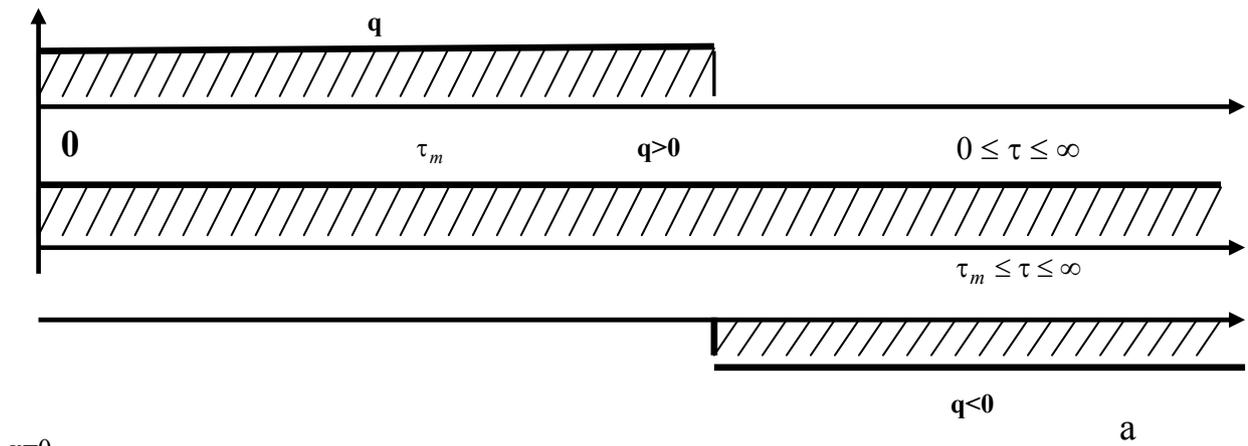
Для первого прохода резьбошлифования площадь контакта

$$S_1 = 2 \sqrt{\frac{D \cdot d}{D + d}} \int_0^{R \arccos \frac{R-t_1}{R}} \sqrt{R \cos \frac{l}{R} - (R-t_1)} dl, \quad (5)$$

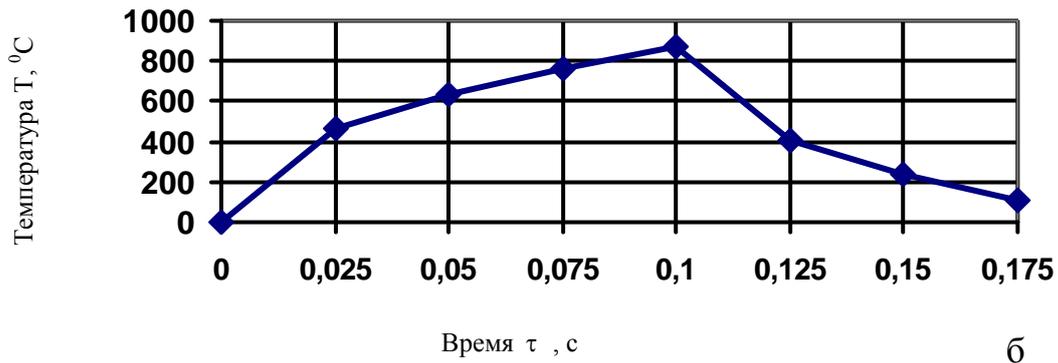
где t_1 - глубина шлифования на первом проходе, мм; x - переменная интегрирования.

Для всех остальных проходов, начиная со второго, расчетная формула для определения площади пятна контакта имеет вид [4]

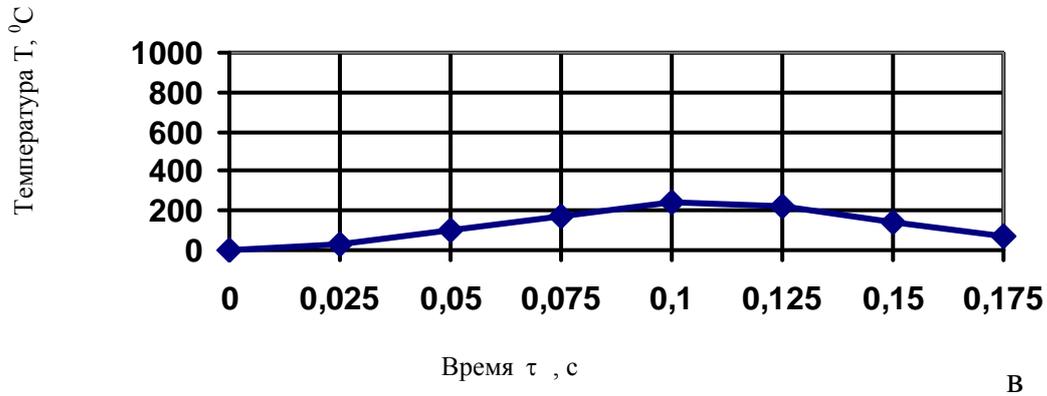
$$S_{k+1} = \sqrt{\frac{D \cdot d}{D + d}} t_{k+1} \cdot R \left[\arccos \frac{R - \sum_{i=1}^n t_i}{R} + \arccos \frac{R - \sum_{i=1}^{k+1} t_i}{R} \right]. \quad (6)$$



$x=0$



$x=x_1=1000$ мкм



$x=x_1=1500$ мкм

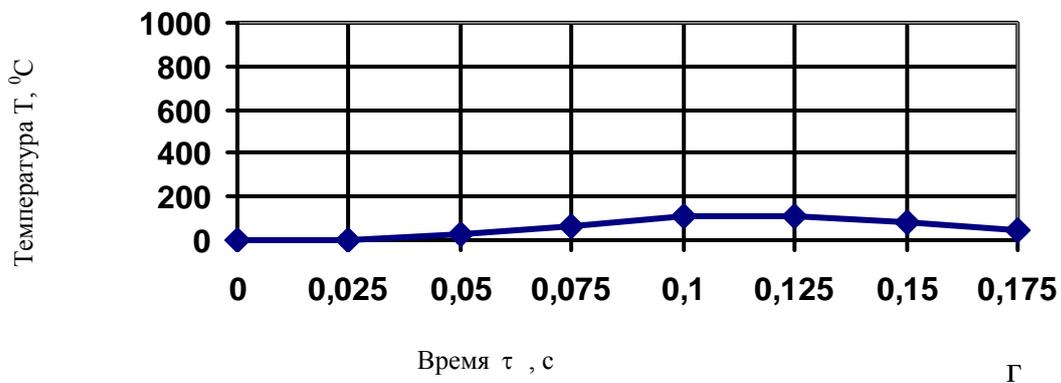


Рис.2. Суперпозиция плотности теплового потока (а) и изменение температурного поля в зависимости от времени действия теплового источника при расстоянии до рассматриваемой точки $x=0$ (б), $x=1000$ мкм (в) и $x=1500$ мкм (г).

Для диагностики процесса по температурному критерию мощность резбошлифования (P) и режимные параметры (t и V) могут быть измерены непосредственно при обработке. Для этого вычисляют площадь пятна контакта по формулам (5) и (6), плотность теплового потока по формуле (4), время действия теплового источника по формуле (2). Производят расчет температуры по уравнению (1).

Для определения глубины, на которую распространяется любая фиксированная температура $T_{\text{фикс.}}$, необходимо с определенным шагом увеличивать координату x от начального значения $x=0$ и для каждого принятого значения x подсчитывать температуру $T(x, \tau_m)$ по формуле (1). Т.е., имея зависимость $T(x, \tau_m)$, можно определить величину x из условия $T(x, \tau_m) = T_{\text{кр}}$. В качестве $T_{\text{фикс.}}$ может быть выбрана, например, критическая температура $T_{\text{кр}}$, при которой в материале происходят структурно-фазовые превращения. В этом случае глубина x , на которую проникает критическая температура $T_{\text{кр}}$ равна глубине (h_δ), образующегося при шлифовании дефектного слоя, т.е. $h_\delta = x$.

В математическом пакете MathCAD имеется возможность автоматического решения трансцендентного уравнения с одним неизвестным (численным методом) при условии, если рассматриваемую задачу определения глубины дефектного слоя представить в следующей (принятой в MathCAD) форме

$$T(x, \tau_m) - T_{\text{кр}} = 0. \quad (7)$$

Предварительно необходимо проверить условие бездефектной обработки, которое имеет вид

$$T(x, \tau_m) \leq T_{\text{кр}}. \quad (8)$$

Если условие (8) нарушается, тогда можно определять глубину дефектного слоя.

В качестве примера рассмотрим применение пакета MathCAD для определения температуры. Примем к расчету: $q = 40 \cdot 10^6$ Вт/м²; $R = 3$ мм; $\lambda = 42$ Вт/(м·°С); $a = 8,4 \cdot 10^{-6}$ м/с²; $\tau = 0,1$ с; $x = 0$. Используем типовую форму представления расчетного уравнения в MathCAD (рис.3, а).

Таким образом, результат расчета температуры в зоне контакта ($x=0$) для принятых данных составляет 869,014 °С.

Рассмотрим расчет глубины дефектного слоя в соответствии с уравнениями (7) и (8) для указанных выше данных при $T_{\text{кр}} = 550$ °С. Для этого проверяем условие (8) бездефектной обработки. Поскольку $869,014$ °С > 550 °С, можно использовать стандартную форму (7) решения трансцендентного уравнения с одним неизвестным (рис.3, б). Видно, что $h_\delta = 397,3$ мкм.

Таким образом, описанная выше и проиллюстрированная на конкретном примере, методика определения температуры и глубины дефектного слоя при шлифовании с использованием программного продукта MathCAD, может быть использована в качестве инструментария для диагностики технологической системы резбошлифования по критерию качества поверхностного слоя и для последующего управления процессом с целью обеспечения бездефектной обработки резьбы.

Рассмотренную методику определения температуры и глубины дефектного слоя при резбошлифовании (с использованием MathCAD) можно использовать как на

этапе технологической подготовки производства (при разработке процесса резьбошлифования), так и на этапе, собственно, производства для диагностики этого процесса и управления им.

Mathcad Professional - [Untitled:1]

$a := 8.4 \cdot 10^{-6}$ $q := 40 \cdot 10^6$
 $\tau := 0.1$ $R := 0.003$
 $\lambda := 42$ $x := 0$

$$\frac{-2}{\pi} \cdot \int_0^{1000} \left(1 - \exp\left(\frac{-a \cdot \tau}{R^2} \cdot \zeta^2\right) \right) \cdot \frac{J_0\left(\zeta \cdot \frac{R+x}{R}\right) \cdot Y_1(\zeta) - Y_0\left(\zeta \cdot \frac{R+x}{R}\right) \cdot J_1(\zeta)}{\zeta^2 \cdot (J_1(\zeta) \cdot J_1(\zeta) + Y_1(\zeta) \cdot Y_1(\zeta))} d\zeta \cdot \frac{R \cdot q}{\lambda} = 869.014$$

а

Mathcad Professional - [Untitled:2]

$a := 8.4 \cdot 10^{-6}$ $q := 40 \cdot 10^6$
 $\tau := 0.1$ $R := 0.003$
 $\lambda := 42$ $x := 0$

$$f(x) := -550 + \frac{-2}{\pi} \cdot \int_0^{1000} \left(1 - \exp\left(\frac{-a \cdot \tau}{R^2} \cdot \zeta^2\right) \right) \cdot \frac{J_0\left(\zeta \cdot \frac{R+x}{R}\right) \cdot Y_1(\zeta) - Y_0\left(\zeta \cdot \frac{R+x}{R}\right) \cdot J_1(\zeta)}{\zeta^2 \cdot (J_1(\zeta) \cdot J_1(\zeta) + Y_1(\zeta) \cdot Y_1(\zeta))} d\zeta \cdot \frac{R \cdot q}{\lambda}$$

solution := root(f(x), x)
 solution = 3.973×10^{-4}

б

Рис.3. Окно программы MathCAD при расчете температуры (а) и глубины дефектного слоя (б) по уравнению (3).

Литература: 1. В.О. Вайсман, О.Ф. Дашенко, Л.В. Коломиець, О.В.Ухов. Методологія аналізу та синтезу технічних рішень: Монографія.— Одеса: Астропринт, 2003. — 176 с. 2. Качество изготовления зубчатых колес / А.В. Якимов, Л.П. Смирнов, Ю.А. Бояршинов и др. — М.: Машиностроение, 1979. — 192 с. 3. Технологія машинобудування: Підручник / О.В.Якимов, В.М.Царюк, О.О.Якимов, Г.О.Оборський, В.П.Ларшин, О.В.Самойленко. — Одеса: Астропринт, 2001. — 608 с. Рос. мовою. 4. Управление качеством поверхностного слоя при резьбошлифовании / В.П.Ларшин, Н.В. Лищенко // Новые нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: Мат. научн.-техн.конф., г. Одесса, 2 — 4 июня 2004г. — Киев, 2004. — С.108–111. 5. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов, А.Н. Паршаков, В.И. Смирцев, В.П. Ларшин. — К.: Техніка, 1983. — 184 с.

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
РЕЗЬБОШЛИФОВАНИЯ**

Ларшин В.П., докт.техн.наук, **Лищенко Н.В.,** **Рагнев И.П.**
(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. 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 трудоемкой процедурой, особенно при правке точечными правящими инструментами. 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 в свою очередь 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.

Современный уровень развития средств и программного обеспечения вычислительной техники позволяет осуществлять трехмерное геометрическое моделирование элементов технологической системы резьбошлифования, находящихся в определенной взаимосвязи. Исследование трехмерной геометрической модели позволяет решать ряд геометрических задач:

- разработка способа профилирования шлифовальных кругов для обеспечения требуемых параметров резьбы по форме и размерам профиля (зная форму и геометрические параметры резьбы, заданные на чертеже детали, определить форму и геометрические параметры правящего ролика при известном его пространственном положении относительно шлифовального круга и обрабатываемой заготовки);
- определение площади пятна контакта круга с деталью при расчетах температур шлифования;
- оценка неравномерности температурного поля по ширине профиля, исходя из данных п.2;
- определение интенсивности съема припуска ($\text{мм}^3/\text{с}$) при расчетах сил резания, удельной работы шлифования и т.п.;
- теоретическое исследование влияния погрешностей настройки технологиче-

ской системы на указанные выше параметры, например, влияние погрешности настройки круга на угол подъема резьбы, на площадь пятна контакта и температуру шлифования.

Сегодня 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 следующем.

1. Построение геометрической 2D - 3D - модели заготовки с предварительным нанесением на ее участке резьбы требуемого шага и профиля.
2. Построение вспомогательной плоскости A' (рис.1), касательной к цилиндрической поверхности заготовки и проходящей через прямую 1—2 (образующую цилиндра), которая параллельна оси заготовки O .
3. Перемещение плоскости A' перпендикулярно линии $1O/3$ и фиксация ее в точке O' , которая принадлежит оси шлифовального круга. Новое положение плоскости A' соответствует плоскости A на рис.1.
4. Установка угла наклона шлифовального круга на угол подъема резьбы осуществляется поворотом плоскости шлифовального круга относительно оси $1O/3$. На рис.1 угол наклона шлифовального круга определяется углом между линиями 4 и 5, выходящими из точки O' (линия 5 характеризует нулевой угол наклона шлифовального круга $\varphi=0$). Наклон круга на угол φ в противоположную сторону характеризуется линией 6, также проходящей через точку O' .

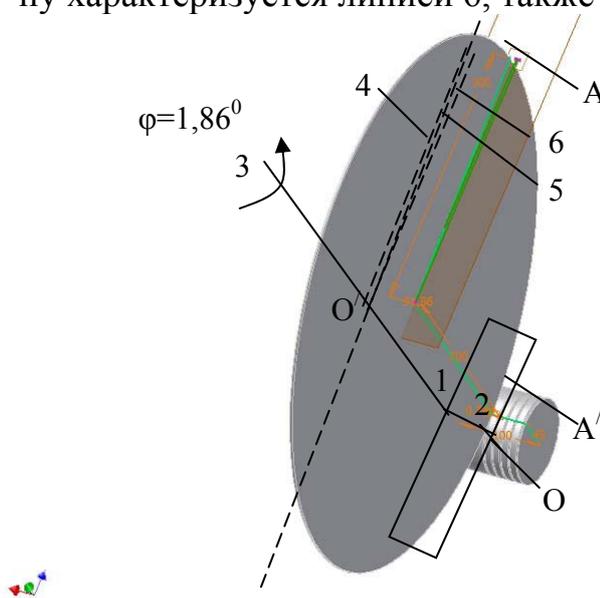


Рис.1 Схема построения 3-мерной геометрической модели ТС.

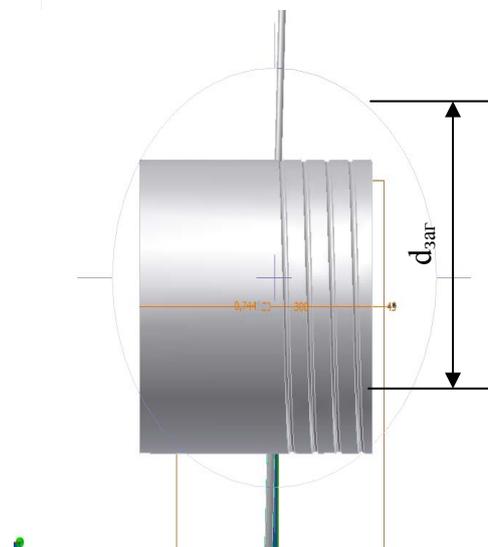


Рис.2 Технологическая система резьбошлифования: вид спереди.

Обеспечение и контроль при моделировании вышеперечисленных пунктов является необходимым условием адекватности трехмерного геометрического моделирования ТС. Для иллюстрации результатов моделирования представлен вид элементов ТС (кроме правящего ролика), на рис.2, на котором видно взаимное положение шлифовального круга и заготовки в процессе формообразования правой резьбы при шлифовании от заднего центра к переднему.

Анализ этого рисунка позволяет установить, что он соответствует шлифованию

правой резьбы, а его достоверность подтверждается совпадением с соответствующим видом реальной ТС резьбошлифования.

На рис.1 и рис.2 приняты следующие геометрические параметры: диаметр шлифовального круга $D_{шк} = 300$ мм, диаметр заготовки $d_3 = 98$ мм, шаг нарезаемой резьбы $P = 10$ мм, угол подъема винтовой линии $\varphi = \text{arctg} \frac{P}{\pi d_3} = 1,86^\circ$.

Разработанная модель использована для определения формы, размеров и площади пятна контакта, которое представлено на рис.3.

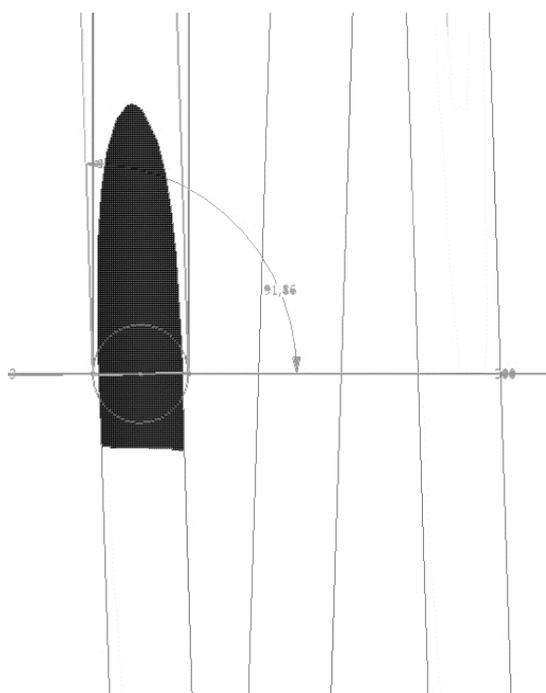


Рис.3 Пятно контакта шлифовального круга с заготовкой на первом переходе (результат моделирования).



Рис.4 Пятно контакта шлифовального круга с заготовкой на первом переходе (результат шлифования).

Для оценки адекватности разработанной геометрической модели ТС проводили экспериментальные исследования пятна контакта при однократном многопроходном резьбошлифовании (рис.4).

Геометрические параметры элементов ТС соответствовали принятым в модели. Распределение припуска по технологическим переходам резьбошлифования представлены в таблице. Там же приведены результаты расчета площади пятна контакта по двумерной (упрощенной модели) и описанной выше трехмерной модели ТС (расчет выполнен программой AutoDeskInventor).

Таблица

Номер прохода	1	2	3	4
Глубина шлифования, мм	0,744	0,464	0,409	0,383
Площадь пятна контакта по двухм. модели, S_k , мм ²	25	28,99	33,35	37,06
Площадь пятна контакта по трехм. модели, S_k , мм ²	27,285	33,247	37,737	41,935
Относит. погрешность, %	8,4	12,8	11,6	11,6

Видно, что различие в результатах расчета составляет до 13 %, что дает возможность в инженерных расчетах использовать формулы для расчета площади пятна контакта, полученные двухмерным моделированием.

УДК 621.992.4

КОМПЬЮТЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА МНОГОНИТОЧНОГО РЕЗЬБОШЛИФОВАНИЯ ХОДОВЫХ ВИНТОВ

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

Multi-rib thread grinding diagnostic method based on the closer definition formula for calculation of the contact surface square.

Шарики-винтовые передачи нашли широкое применение в станкостроении, авиастроении, атомной и военной технике. Наиболее ответственной деталью передачи является ходовой винт. В настоящее время существует несколько вариантов технологических процессов механической обработки шариковых винтов качения, отличающихся методами резьбоформирования: 1) нарезание лезвийным инструментом; 2) пластическое деформирование; 3) шлифование многониточными и однониточными кругами; 4) электрохимическое шлифование.

Обработка лезвийным инструментом является универсальным методом, осуществимым в условиях любого производства на обычных токарно-винторезных станках, токарных станках с ЧПУ, либо на специальных резьботокарных полуавтоматах. Однако распространение этого метода ограничено, так как последующая закалка может вызывать значительные продольные деформации винтов и большое рассеяние этих деформаций. Вследствие большой длины винта линейные изменения резьбы и искривление оси винта бывают настолько велики, что припуск под шлифование оказывается слишком большим.

Наряду с нарезанием резьбы резцом на токарно-винторезных станках или токарных станках с ЧПУ резьбу фрезеруют на аналогичных станках либо с последующей термической обработкой, либо по закаленной заготовке. При этом применяют специальный режущий инструмент - одно- или многорезцовую головку, которую устанавливают на суппорте токарно-винторезного станка и приводят в движение от отдельного электродвигателя.

Метод вихревой нарезки резьбы возможно использовать при нарезании резьбы на сырых и закаленных заготовках, но при внесении корректив в шаг нарезаемой резьбы (систематическая погрешность или среднее значение случайной погрешности) [1].

Пластическое деформирование резьбы ходовых винтов качения осуществляется способом поперечно-винтовой прокатки на специальных двух или трехвалковых станках - автоматах [2]. Этот метод выполняется на незакаленных заготовках. Накатывание резьбы на винтах по сравнению с нарезанием резцом существенно снижает трудоемкость предварительного резьбоформирования. Недостатком этого метода является изменение накопленной ошибки шага резьбы в партии накатанных винтов при незначительном разбросе диаметров заготовок, либо различии в их исходной микроструктуре.

В качестве перспективного метода формирования резьбы в сплавах повышенной твердости часто применяют электрохимическое шлифование. Этот метод обеспечивает значительный рост производительности труда, снижение затрат и повышение эффективности производства при достижении высоких эксплуатационных свойств обработанных поверхностей. Однако отсутствуют сведения о применении

электрохимического шлифования при изготовлении ходовых винтов и соответствующих средствах технологического оснащения.

Промышленный опыт и исследования [3] показывают, что требуемую точность и шероховатость поверхности резьбы закаленных винтов качения в настоящее время обеспечиваются шлифованием однопунктными и многопунктными резьбошлифовальными кругами.

Обработка однопунктным кругом сопровождается малыми тепловыми и силовыми воздействиями на заготовку и позволяет получить высокую точность и качество поверхности резьбы. Однако этот способ формирования резьбы характеризуется низкой производительностью, быстрым износом кругов, большими затратами времени на правку кругов, замену их и балансировку. Применение многопунктных резьбошлифовальных кругов позволяет увеличить производительность обработки за счет уменьшения машинного времени резьбошлифования.

Высокая теплонапряженность процесса многопунктного резьбошлифования часто является причиной структурных изменений в поверхностном слое резьбы. Для формирования необходимых параметров качества обработанных деталей необходимо управлять процессом многопунктного резьбошлифования таким образом, чтобы не допускать появления шлифовочных дефектов. В настоящее время возможно два способа управления процессом. Первый - проектирование оптимальных конструкций многопунктных резьбошлифовальных кругов, т.е. определение оптимального количества и оптимальных геометрических параметров режущих ниток кругов с учетом их характеристик. Однако этот способ не позволяет учитывать непредсказуемую режущую способность многопунктных кругов, местные изменения твердости материала заготовки и другие погрешности. Это может привести к колебаниям сил и температур шлифования и, как следствие, к появлению шлифовочных дефектов. Второй способ управления основан на применении систем компьютерной диагностики и управления. Вопросам обеспечения точности резьбошлифования с использованием систем диагностики и управления посвящено некоторое количество работ, в то же время задача формирования качественных характеристик поверхностного слоя с использованием таких систем относится к числу проблемных. Поэтому исследование путей и возможностей обеспечения качественных характеристик поверхностного слоя деталей за счет использования диагностики процесса является актуальной задачей в технологии машиностроения.

Блок-схема компьютерной системы диагностики и управления применительно к процессу однопунктного резьбошлифования представлена на рис. 1.

Эта система включает в себя следующие подсистемы, каждая из которых является элементом системы: 1) технологическая система резьбошлифования (объект диагностики и управления); 2) персональный компьютер; 3) датчики: ДПП – датчик поперечной подачи; ДМ – датчик мощности; ДСД – датчик скорости детали; 4) человек — оператор-резьбошлифовщик. Кроме того, на рис.1. введены следующие обозначения: 1, 2, 3, 4 –вычислительные блоки глубины шлифования (или остаточного припуска $z_{ост}$), удельной работы шлифования $A_{y\delta}$ (или плотности теплового потока q), температуры шлифования T (и глубины дефектного слоя h_{δ}), площади пятна контакта S (или интенсивности шлифования Q); CC – синхросигнал; R – радиус профиля шлифуемой резьбы, D, d – диаметры шлифовального круга и заготовки, соответственно, $T_{кр.}^*$ – критическая температура, λ, c, γ – параметры физико-механического состояния поверхностного слоя (теплопроводность, удельная тепло-

емкость, плотность обрабатываемого материала, соответственно), ξ_n – коэффициент запаса по прижогу.

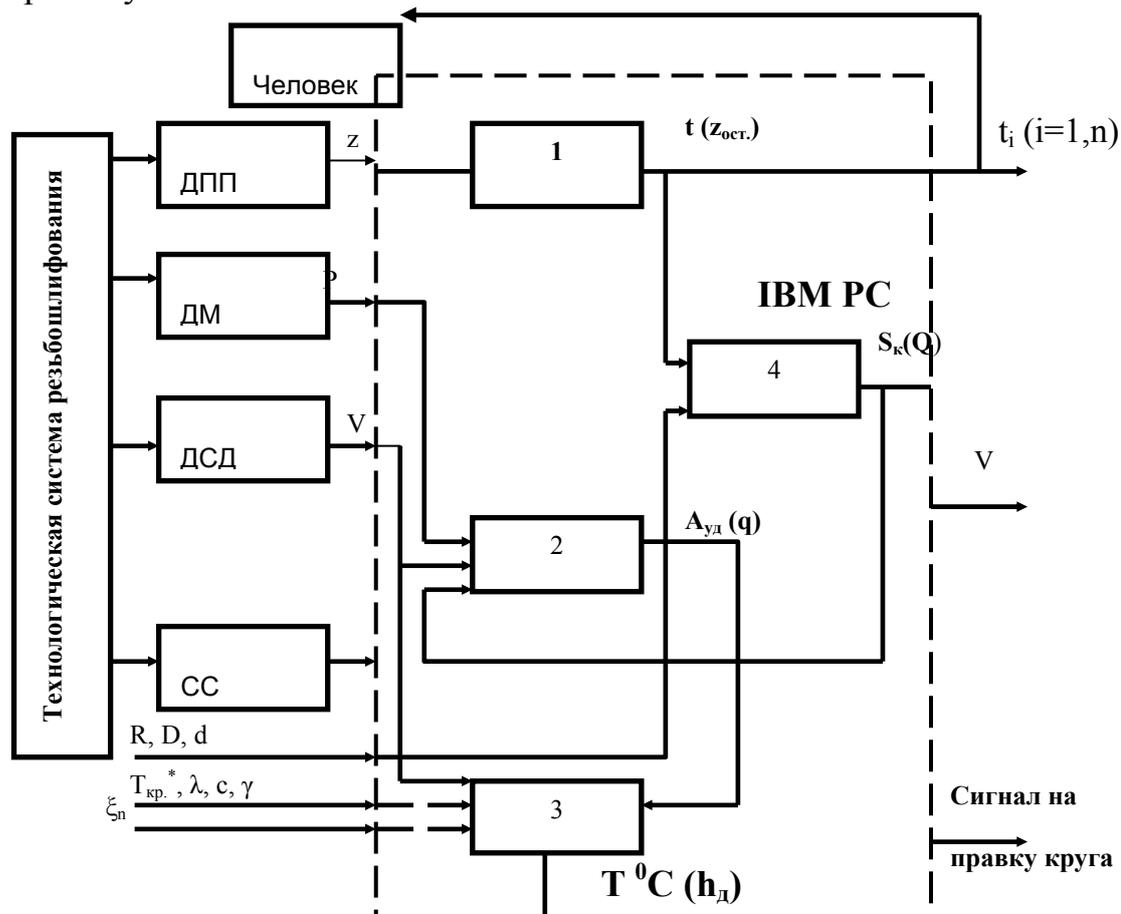


Рис.1. Блок-схема системы компьютерной диагностики и управления.

Выходными параметрами системы являются режимы шлифования: скорость детали (V) и глубины шлифования по проходам (t), определяемые из условия высокопроизводительного бездефектного шлифования.

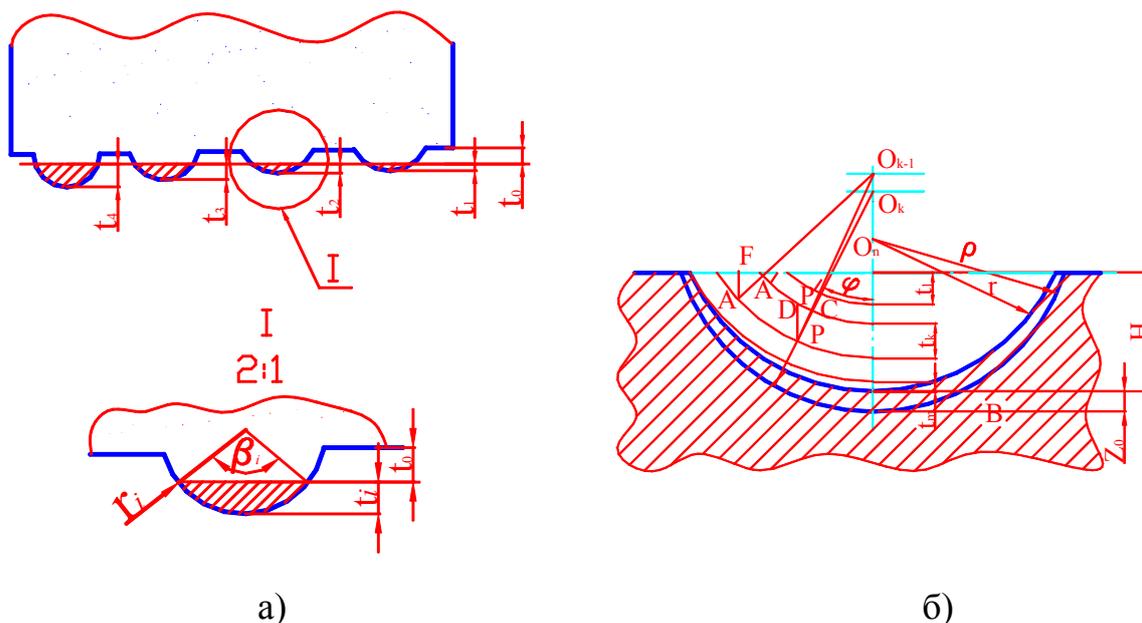


Рис.2. Конструкция m -ниточного круга при $m=4$ (а) и схема формирования им резбовой канавки (б), где t_i, r_i, β_i — высота рабочей части, радиус профиля и угол i -ой ($i = 1, 2, \dots, m$) режущей нитки; ρ — окончательный радиус резбы; t_0 — технологический зазор.

При диагностике многониточного резьбошлифования блок ДПП не используется в виду того, что в конструкцию многониточного круга закладывается программа распределения припуска на шлифование между отдельными нитками круга (рис.2), и, следовательно, площадь пятна контакта между нитками шлифовального круга и заготовкой известны [4].

Анализ литературных источников показал, что применительно к резьбе полукруглого профиля имеется следующая формула для определения площади пятна контакта. Для первого прохода резьбошлифования площадь контакта [5]

$$S_1 = 2 \sqrt{\frac{D \cdot d}{D + d}} \int_0^{R \arccos\left[\frac{R-t_1}{R}\right]} \sqrt{\sqrt{R^2 - x^2} - (R - t_1)} dx, \quad (1)$$

где t_1 - глубина шлифования на первом проходе, мм; x - переменная интегрирования.

Однако эта формула определяет не площадь поверхности контакта, а площадь ее проекции на плоскость. Для уточнения расчетной формулы рассмотрим схему на рис.3.

Для первого прохода резьбошлифования площадь пятна контакта S_1 с учётом данных работы [4]

$$S_1 = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} L(l) dl, \quad (2)$$

где $L(l)$ - длина дуги контакта в направлении вектора скорости детали, зависящая от длины дуги в поперечном сечении l .

Известно, что длина дуги l окружности радиуса R связана с ее центральным углом α следующей зависимостью

$$l = R \cdot \alpha \quad (3)$$

Из треугольника $O1AB$ (рис.3) определяют угол α .

$$\alpha = \arccos \frac{R - t_1}{R} \quad (4)$$

Тогда

$$l = R \cdot \arccos \frac{R - t_1}{R}. \quad (5)$$

Длина дуги в продольном сечении шлифовального круга определяется для мгновенной координаты l по известной формуле [4]

$$L(l) = \sqrt{\frac{D \cdot d}{D + d}} \cdot t(l), \quad (6)$$

где $t(l)$ - мгновенная глубина резания в зависимости от длины дуги контакта l .

Из геометрической схемы на рис. 3

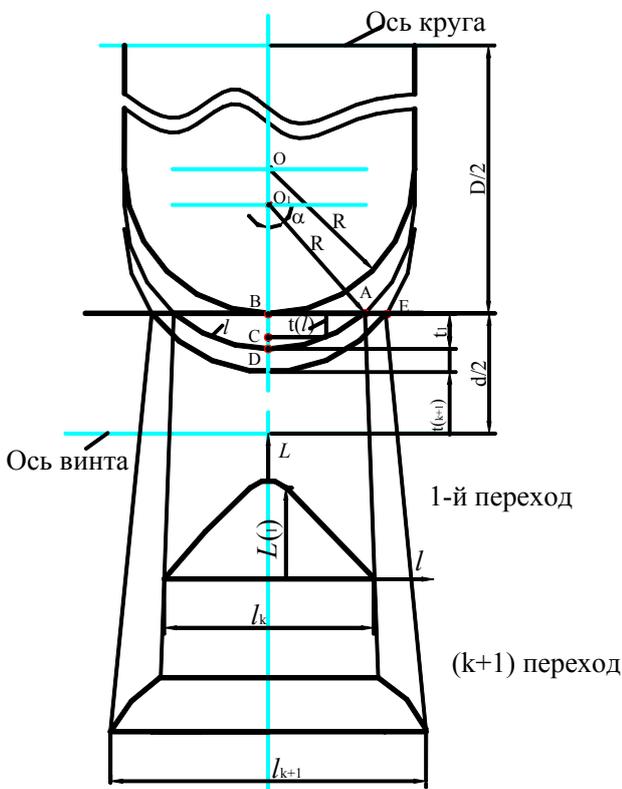


Рис.3. Расчетная схема для определения площади пятна контакта между кругом и изделием.

можно установить зависимость величины $t(l)$ от длины дуги контакта l .

$$t(l) = t_1 - CD = t_1 - (R - O_1C) = t_1 - (R - R \cos \alpha) = t_1 - R(1 - \cos \frac{l}{R}) = R \cos \frac{l}{R} - (R - t_1). \quad (7)$$

С учетом выражений (2) - (8) получаем

$$S_1 = 2 \sqrt{\frac{D \cdot d}{D + d}} \int_0^{R \arccos \frac{R-t_1}{R}} \sqrt{R \cos \frac{l}{R} - (R - t_1)} dl. \quad (8)$$

Выполним сравнительный расчет площади пятна контакта по формулам (1) и (8) при следующих исходных данных: $D=0,400$ м; $d=0,050$ м; $R=0,003$ м; $0 \leq t_1 \leq 2,1$ мм (рис.4).

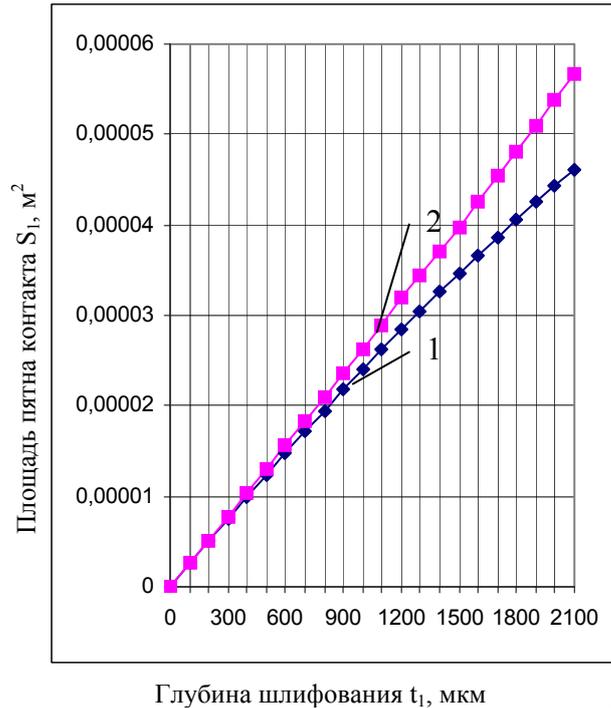


Рис.4. Зависимость площади пятна контакта от глубины шлифования: 1- расчет по уравнению (1), 2- расчет по уравнению (8)

Как видно из рис.4 площади пятна контакта, вычисленные по формулам (1) и (8) отличаются. Различие составляет от 0,8% до 18% (в зависимости от величины t_1).

Уменьшение погрешности расчета площади пятна контакта приводит к более точному определению температуры шлифования и глубины дефектного слоя при диагностике технологической системы.

Разработанная система компьютерной диагностики и управления (рис.1) может быть использована для диагностики одно- (с использованием ДПП) и многониточного (без ДПП) резьбошлифования.

Литература: 1. Ларшин В.П., Лищенко Н.В. Определение межподналадочного периода работы автоматизированных металлорежущих станков // Научно-технические проблемы станкостроения, производство технологической оснастки и инструмента: Мат. междунар. конф.— Киев: АТМ Украины, 2002. — С. 70-72. 2. Якобсон М.О., Фунберг А.П. Современные методы изготовления винтовых пар качения. — Станки и инструмент, 1965. — № 3. — С.32-35. 3. РТМ2 МТ11-3-79 Применение качественных сталей и методов термического упрочнения для ответственных деталей станков. — НИИ Информации по машиностроению. — Москва, 1980. — 61 с. 4. Ларшин В.П. Технология многониточного резьбошлифования прецизионных ходовых винтов // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 1999. — Вып.2(8). — С. 87-91. 5. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов, А.Н. Паршаков, В.И. Свирщев, В.П. Ларшин. — К.: Техніка, 1983. — 184 с.

**ДО ПИТАННЯ РОЗРОБКИ СПЕЦІАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ
ШЛІФУВАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ З НТМ****Лавриненко В.И.,** докт. техн. наук, **Лещук І.В.** (м. Київ, Україна)

Questions of development of special designs faltering grinding circles and superfirrm materials are considered and scientific preconditions of formation of cutting surface of a circle for the certain conditions of processing are submitted

Якімов О.В., ювілею якого присвячена ця конференція, значну увагу приділяв питанням використання спеціальних конструкцій алмазно-абразивного шліфувального інструменту для впливу на показники процесу обробки, наприклад, теплонапруженість процесу шліфування і таке інше. На наш погляд, це є надзвичайно важливим напрямком досліджень, тому що саме за рахунок спеціальних конструкцій ріжучої поверхні круга можливо вирішити ряд проблем, які не вирішуються стандартним інструментом.

Так, наприклад, нарівні із вирішенням питання зниження зносу кругів, важливим є урегулювання питання погіршення шорсткості при збільшенні продуктивності обробки. Аналогічно зносу, із зникненням колового паска на поверхні круга шорсткість обробної поверхні значно погіршується. Для уникнення цього, нами розроблена низка конструкції кругів, які дозволяють стабілізувати профіль круга у радіальному напрямку за рахунок віднайдення співвідношення навантаження на ріжучу поверхню круга, з площею, що його сприймає. Важливим елементом профілю при цьому, є наявність перехідного колового паска, який є відповідальним за формування малої шорсткості поверхні, що піддається обробці. Оскільки причина погіршення шорсткості полягає у тому, що поверхня піддається обробці мінімальною кількістю абразивних зерен, які знаходяться на вершині трикутного профілю, то для отримання необхідної шорсткості треба забезпечити наявність на робочій поверхні колового паска певної шириною. Тим самим, виникає необхідність створення кругів для шліфування з подовжньою подачею з фіксованим трапецеоподібним профілем. При розробці таких кругів необхідно враховувати, що основною умовою стабілізації профілю є забезпечення рівності лінійних швидкостей зносу усіх складових профілю круга.

Розглянемо тепер питання виконання перехідного колового паска (ПКП) для формування необхідної шорсткості поверхні. Відомо, що ПКП приймає участь у з'ємі 2% припуску. Нагадаємо, що у звичайному крузі під час його роботи пасок не зберігається, оскільки спостерігається невідповідність між обсягом припуску та площею ріжучої поверхні колового паска. Це призводить до того, що лінійний знос паска відстає від лінійних зносів головного та допоміжного різальних конусів. Щоб уникнути цього, необхідно зрівняти швидкості зносу, для чого необхідно привести у відповідність величини з'єму припуску і площі ріжучої поверхні круга.

Одним з варіантів досягнення такої відповідності є формування переривчастого ПКП, загальна площа якого не перевищувала би площу, необхідну для з'єму 2% припуску. У даній конструкції круга для глибинного шліфування новим є наявність у його робочому шарі канавок, виконаних по дузі кола таким чином, що шар розташований між канавками по колу, у процесі шліфування залишається еквідистантним поверхні обробки і забезпечує необхідну її якість. Вкажемо також ще на одну особливість, яка полягає у тому, що шліфування виробу здійснюється робочим шаром круга з переривчастою робочою поверхнею. Це дозволяє, крім

іншого знизити рівень температур безпосередньо у зоні кінцевої обробки поверхні.

Другим варіантом заповнення канавки ПКП є виконання його з матеріалу зв'язки. Робочою гіпотезою, що покладена в основу такої конструкції, є гіпотеза, згідно якої, завдяки рівномірному зносу, робоча поверхня паска залишається паралельною поверхні обробки і, тим самим, забезпечує її необхідну шорсткість, внаслідок анодного розчинення вершин мікронерівностей. Звернемо увагу на те, що якраз цей варіант є ідеальним випадком можливої реалізації усіх переваг анодного розчинення. В цілому нами розроблені 2 конструкції кругів 12A2-45⁰ 150x10(5-3-2)x3 та 150x20(10-6-4)x3 з ПКП з матеріалу зв'язки.

Оскільки ми вже торкнулися питання зниження температур при переривчастому різанні, то необхідно вказати, що для умов високопродуктивного групового шліфування достатньо великих площин пластин з термочутливих інструментальних матеріалів, які містять в структурі карбіди металів IVb - Vb підгруп, додатково виникає необхідність зниження температури шліфування і поліпшення умов доставки охолоджуючої технологічної рідини у зону обробки. У цьому випадку основна частка припуску піддається з'єму при прямому ході стола. Температура, що виникає при зворотньому ході у 1,5...2,0 рази нижче і не чинить істотного впливу на фізико-механічний стан поверхневого шару. Тому, переривчастий шар доцільно змістити на частину гоовного ріжучого конусу, залишивши суцільний робочий шар тільки на самому вході круга, що забезпечує у даному випадку безударну роботу у момент зіткнення круга з деталлю на початку роботи. Наявність западин сприяє зниженню температури при робочому ході. Для утримання трапецеподібного профілю ріжучої поверхні на ній виконана колова канавка, яка грає роль ПКП. Але для умов такого високопродуктивного шліфування більше значення має не шорсткість, а зменшення температури. Оскільки подовжня подача на 3--4 порядки менше швидкості обертання круга, то час охолодження при проходженні колової канавки також буде на 3-4 порядки вище, аніж при проходженні западини. Тому, в даній конструкції круга канавка нічим не заповнюється і залишається вільною для кращого проходження охолоджувальної рідини.

Наведена вище конструкція круга застосовується для шліфування суцільних поверхонь. А у випадку обробки переривчастих поверхонь, наприклад, зубчастих рейок передніх поверхонь черв'ячних фрез необхідно обмежитися лише зовнішньою частиною ріжучої поверхні наведених вище кругів, до суцільної колової канавки. З урахуванням цього, для підвищення ефективності заточування фрез, розроблені спеціальні круги форми 12D9 (з робочим шаром поліпшеної форми, у порівнянні із стандартними кругами) з шириною робочого шару 12 та 16 мм. Дослідження засвідчили, що круги нової конструкції забезпечують значно менші витрати кубоніту у 2,6...3,7 рази, аніж стандартні круги. Крім більш рівномірного зносу, це також пов'язано з відсутністю касання сталевого корпусу круга із фрезою при заточуванні і, у зв'язку з цим, із зменшенням електроконтактних явищ.

Таким чином, наведені нами вище умови досягнення стабілізації форми профілю круга у радіальному напрямку дозволили розробити низку конструкцій шліфувальних кругів з НТМ, які дають можливість досягти не тільки необхідних показників шорсткості поверхні, що піддається обробці, а і зменшити, у певній мірі, теплонапруженість процесу шліфуванні інструментальних матеріалів, які містять у структурі карбіди металів IVb - Vb підгрупи, за рахунок переривчастої поверхні.

Нарівні із стабілізацією форми профілю круга у радіальному напрямку важливим технологічним засобом підвищення зносостійкості кругів при перевищенні зна-

чення критичної продуктивності обробки є реалізація нашого положення про те, що для зниження зносу круга необхідно прагнути до зменшення швидкості руху хвильової формозміни у коловому напрямку та уникати різких зривів гребеню хвилі. Для цього, нами сформульовані принципи, яких у даному випадку треба дотримуватися: по-перше, внести хаотичність у процес руху хвилі, щоб зменшити швидкість руху; по-друге, розділити хвилю, як мінімум на дві, щоб збалансувати зриви її гребеню. Для їх реалізації нами запропонована нова конструкція круга з чергуючимися шарами у коловому на-прямку, причому періодичність чергування є нерівномірною.

Розглянемо особливості роботи таких кругів. На вставні сектори лягає найбільше навантаження при шліфуванні, тому у процесі обробки їх ріжуча поверхня у коловому напрямку має нерівномірний елементний склад, що нагадує хвилю. Так, та частина сегменту, що першою входить у контактну зону вміщує більшу кількість Cu та Sn , і меншу кількість наповнювача (Al), який «вимивається» шламом. У свою чергу, елементи матеріалу, що піддається обробці, у більшій мірі накопичуються ближче до кінцевої частини сегменту. Особливо відчутно це спостерігається при шліфуванні нержавіючої сталі, коли загальний вміст елементів сталі (Fe , Ni , Mn) хвилеподібно зростає від початку до закінчення сегменту (10,7→11,4→20,4→17,3 мас.%) при звичайному вмісті його після шліфування на поверхні стандартного суцільного круга - 12,4 мас.%. Це свідчить про те, що на кожній вставці починають формуватися свої хвильові процеси.

Оскільки описаний вище варіант круга є багатошаровим, то постає питання надійного зчеплення таких шарів. Вирішити це можливо за рахунок виявленого нами ефекту зміни градієнту концентрації зв'язуючого у поверхневому шарі. Нагадаємо, що він спрацьовує лише у тому випадку, коли є каркас та відносно легкоплавка складова. Це відноситься найкраще до зв'язок системи $Cu - Sn - Sb$, оскільки, вони мають і цю легкоплавку складову (Sn) і деякий каркас у вигляді інших компонент (Cu , Sb , Al_2O_3), а реалізується найліпше на вставних секторах, за рахунок ефекту подвійного спікання. У цьому випадку, рухома фаза витискується, по-перше, у поровий простір, заповнюючи його, що призводить до підвищення твердості секторів з 92...93 до 102...114 HRB , а по-друге, у зону контакту секторів, що покращує їх зчеплення. Так, вміст Sn у середині сектору складає 10,6 а поблизу зони контакту секторів - 15,8 мас.%. Вкажемо, що температура, при якій починає спрацьовувати ефект подвійного спікання, у даному випадку складає $180^{\circ}C$, коли з'являється в'язка фаза.

Таблиця 1

Показники працездатності кругів з чергуючимся ріжучим шаром при шліфуванні сплаву Т15К6

Характеристика круга 12A2-45 150x10x3x32	Показники шліфування		
	Відносні витрати алмазів, мг/г	Ефективна потужність шліфування, кВт	Шорсткість поверхні, R_a , мкм
АС6 125/100 - МО20-2 - 100%	0,72	0,85	0,25
Характеристика вставних секторів:			
АС6 125/100 - МО20-2 - 100%	0,45	0,85	0,24
АС6М 125/100 - МО20-2 - 100%	0,76	0,62	0,25
АС4 125/100 - МО20-2 - 100%	0,32	0,78	0,29
АС6 63/50 - МО20-2 - 100%	0,46	0,40	0,19
АС6 125/100 - МО20-2 - 50%	0,55	0,90	0,29

Для зв'язок з основами *Cu - Sn* та *Cu - Al - Zn* такий ефект не може бути застосований, оскільки відсутні умови для його спрацювання: у першому випадку - відсутній каркас, а у другому, навпаки, відсутня яскраво виражена легкоплавка складова. Вкажемо, також, що наведений ефект сприяє більш ефективному використанню у вставних секторах малоходових шліфпорошків менших міцностей та зернистостей НТМ, що є позитивним фактором, і досягти підвищення зносостійкості кругів в 1,3...2,25 рази (табл.1).

Звернемо увагу на ще один момент, пов'язаний з використанням ефекту чергування вставок ріжучого шару з різними властивостями. При електрошліфуванні, за рахунок чергування шарів із різним електроопором, це дає можливість накласти на процес з постійним струмом ще і імпульсні його коливання. Вкажемо, що для досягнення вказаного ефекту коливання струму необхідно розрахувати мінімальну кількість ділянок із зниженим електроопором. Описаними вище прийомами ми можемо змінювати електропровідність системи і отримувати гарантований ефект підвищення зносостійкості кругів при електрошліфуванні інструментальних сталей. Наприклад, при однаковій зі стандартними кругами потужності шліфування (1,4 кВт), круги з чергуючимися шарами дозволяють підвищити продуктивність шліфування зразків зі сталі Р6М5Ф3 з 1200 до 1800 мм³/хв. При цьому, технологічний струм дорівнює 210 А. Це дозволило отримати своєрідний процес імпульсно-циклічного шліфування і досягти, у порівнянні з традиційними кругами, підвищення продуктивності обробки в 1,5 рази при однаковому зносі, або знизити витрати КНБ у 1,3 рази при однаковій, із серійними, продуктивності шліфування (табл. 2).

Таблиця 2

Показники працездатності кругів з чергуючимися шарами при електрошліфуванні сталі Р6М5Ф3

Характеристика круга	Електроопір кругу, мОм	Технологічний струм, А	Ефективна потужність шліфування, кВт	Відносні витрати КНБ, мг/г	Шорсткість поверхні, Ra, мкм
КР 100/80 - 100% МО20-2	4	240	1,35	2,7	0,38
КР 100/80 - 100% МО20-2 (з чергуючимися вставками зі зв'язкою В1-13)	4/18	180	0,95	2,1	0,38

УДК 621.923

ЭФФЕКТИВНЫЕ ШЛИФОВАЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ НА ОСНОВЕ НОВЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ ИЗ СТМ

Шепелев А.А, док. техн. наук, Поладко Е.П., канд. техн. наук, Рябченко С.В., канд. техн. наук, Гржибовский Б.Б., Шепелев А.А. (мл.), Дуброва А.Е.
(г. Киев, Украина)

New grinding instruments from SHM, intended for handling hard alloys, tool steels, ceramics, a glass, polymeric and other materials are submitted. Performances of the instrument are reduced and efficiency of their application in different industries is shown.

Научно-технологический алмазный концерн «АЛКОН» (НТАК) и его головная организация – Институт сверхтвёрдых материалов (ИСМ) им. В.Н. Бакуля

НАН Украины известны своими фундаментальными исследованиями в области синтеза сверхтвёрдых материалов, создания на их основе эффективных инструментов и технологических процессов обработки материалов в различных отраслях промышленности. Приоритетными разработками являются: создание порошков из синтетических алмазов и кубического нитрида бора, поликристаллов, паст, шлифовальных кругов, алмазных сегментов и сегментных кругов, отрезных кругов, буровых коронок и долот, правящих инструментов, изделий из керамики.

Целью настоящей статьи является аналитическое исследование эффективности применения шлифовальных инструментов из синтетических алмазов и кубического нитрида бора на основе новых инструментальных композитов из СТМ, разработанных в результате выполнения инновационных программ и контрактов. Основная номенклатура инструментов из СТМ приведена в табл. 1.

Таблица 1

Основная номенклатура инструментов из СТМ, выпускаемых концерном «АЛКОН»

№ п.п.	Наименование инструмента	Форма и размеры
1.	Алмазно-абразивный инструмент:	
	• отрезные круги	1A1R (Ø100... Ø400)
	• шлифовальные круги	1A1(Ø20...Ø400); 12R4(Ø80...Ø125); 2A2x20°(Ø80...Ø150); 12A2-45°(Ø80...Ø150); 14EE1X; 1FF1;1EE1(Ø100...Ø150)
	• шлифовальные круги двухслойные	12A2-45°(Ø100...Ø150); 12A2-20° DØ125; 12M2-45° Ø125
	• бруски	АБХ; АБХ (комплект 12 шт.)
2.	• шлифовальные круги из кубонита	1A1(Ø20...Ø400); 12R4(Ø80...Ø125); 12A2x20°(Ø80...Ø150); 12A2-45° (Ø80...Ø150); 1EE1Ø160
3.	Алмазный инструмент для обработки неметаллических материалов:	
	• пилы, сегменты, бруски	1AR SS/C1(Ø250...Ø1250) ПАП(L=3730-3950)
	• головки алмазные для шлифования и полирования камня	АГШГ, АГШЧ, АГП(Ø160...Ø450)
	• головки алмазные для шлифования мозаичных полов	ГШ 100-C10x8x1; ГШ 100-C10x8x2; ГШ 100-C12x8x1 (комплект 6 шт.)
	• матрицы полировальные	МП (Ø160...Ø450)
	• сверла	АКС (Ø6...Ø320), САКС Ø75
	• ролики для фасонной обработки	АФРГ, АФРЧ, АФРП (Ø139,5...Ø320,4)
• круги для шлифования огнеупорных материалов	1A1 Ø400x40x6; 6A2 спØ500	

4.	Алмазные планшайбы:	6A2T (Ø100...Ø600)
	<ul style="list-style-type: none"> • обработка полудрагоценных камней, стекла, керамики • обработка бриллиантов 	6A2 сп.Ø300x60x2, 6A2 сп.Ø320x35(40)x2x50
5.	Пасты из алмазов и кубонита:	В - смываемые водой; О – смываемые органическими растворителями; ВО - смываемые водой и органическими растворителями; зернистость алмазного и кубонитового порошков от 125/100 до 0,1/0
	<ul style="list-style-type: none"> • мазеобразные • твердые 	
6.	Правящий инструмент:	
	<ul style="list-style-type: none"> • карандаши 	C10x10x3, C10x10x5, C12x10x3
	<ul style="list-style-type: none"> • бруски • ролики 	БП 80x30x30 C10x8x3-16; БП 80x30x30 C12x8x3-11

Для поиска новых областей применения инструментов из СТМ в технологических процессах обработки выполняются инновационные проекты по созданию новых инструментов для предприятий Украины, стран СНГ и ряда зарубежных стран. К таким разработкам можно отнести следующие перспективные инструменты.

Дисковые алмазные инструменты - круги форм 1A1R и 1A1RSS/C2 на основе инструментальных композитов марки MX5-5 диаметром 90...500 мм толщиной корпуса от 1 до 4 мм позволяют повысить производительность обработки в 2,5...3,0 раза, увеличить срок службы инструмента в 20...25 и более раз, исключить сколы и выкрашивания кромок, их расслоения и прижоги, что приводит к экономии материала на 35...50% и снижению энергозатрат в 1,7...2,0 раза.

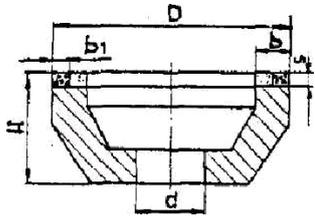
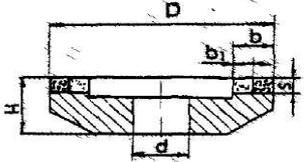
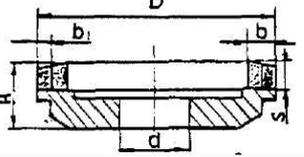
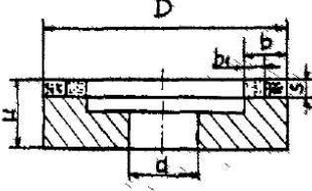
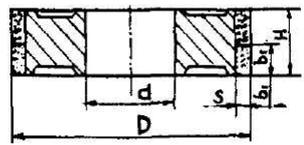
Высокопроизводительные алмазные инструменты с прерывистым рабочим слоем на полимерных и металлополимерных связках (композитах) позволяют снизить температуру в зоне резания и обеспечить рациональный расход алмазов при шлифовании металло- и дереворежущего инструмента, в том числе со стальной державкой за счет оптимизации геометрических параметров прерывистых алмазных кругов форм 12A2, 6A2 и др.

Высокоэффективные специальные шлифовальные круги на полимерных и металлополимерных связках марки В2-01-1 форм: 12A2, 12A9, 12M2, 6A2, 1A1, 14A1 из кубического нитрида бора и синтетических алмазов характеризуются различной характеристикой рабочего слоя. Характеристика наружного слоя отвечает условиям высокопроизводительного шлифования, а внутреннего слоя – условиям доводочного шлифования. Каждый из слоёв изготавливается на определённой связке с использованием требуемых марки, зернистости и концентрации СТМ, что позволяет обеспечивать в процессе обработки оптимальный износ рабочих слоёв. В наружном слое кругов используются шлифпорошки синтетических алмазов марок АС6 - АС15 или кубонит марок КР и КВ зернистостью 80/63 - 200/160, а во внутреннем слое соответственно: зернистостью 40/28 - 63/50 при концентрации порошков СТМ 100 - 125%.

В табл. 2 приведены основные формы и размеры двухслойных кругов. По режущей способности и производительности они превосходят, а по стойкости и качеству обработки соответствуют алмазным кругам зарубежных фирм.

Таблица 2

Типоразмеры шлифовальных кругов с двухслойным рабочим слоем из
СТМ

Форма и обозначение		D	H	S	b	B ₁	d
1		2	3	4	5	6	7
12A2-45°		100	32	3	5	2	20
			34	5			
		125	40	3	10	5	32
			42	5			
		150	40	3	10	5	32
			42	5			
		200	50	3	20	10	76
			52	5			
12A2-20°		125	12	1,5	6	3	32
			24	3,0			
12M2-45°		125	18	6	5	2,5	32
			22	10			
6A2		100	24	3	5	2	20
			125	23			
		150		25	5	10	5
			23	3	20		
			25	5		20	10
			25	5			
1A1		100	8	5		4	20
		150	10	5		5	32
		200	20	5		10	76

Однослойные алмазные круги и барабаны для шлифования полимерных композиционных материалов (ПКМ) применяются в технологических процессах механической обработки на предприятиях самолёто-, судо- и автомобилестроения, без применения специальных охлаждающих жидкостей. Разработаны алмазные инструменты, в которых синтетические алмазы закрепляются на рабочей поверхности в один слой методом гальваностегии.

Применение таких инструментов позволяет:

- повысить срок службы инструмента по сравнению с абразивным (базовым) при шлифовании угле-, стекло-, и органо-стеклопластиков в 5...10 раз, со-товых наполнителей – в 9...10 раз;
- увеличить производительность обработки в 3...9 раз;
- улучшить качество обработанной поверхности, то есть: исключить прижоги, расслоение, ворсистость, обеспечивая шероховатость поверхности ПКМ в

пределах Rz 20...40 мкм;

- обеспечить разнотолщинность шлифованных поверхностей ПМК в пределах $\pm 0,1$ мм и повысить точность обработки в 2,0...2,5 раза.

Сверление отверстий в изделиях из ПКМ и МПКМ осуществляется, как правило, спиральными сверлами из быстрорежущей стали, цельными твердосплавными или составными, оснащенными пластинами твердого сплава. При этом происходит интенсивный износ режущего инструмента, что требует частых его переточек. Качество обработки низкое из-за расслоения, ворсистости и сколов кромок материала изделий. Процессу зенкерования отверстий присущи те же недостатки. Разработаны стержневые и кольцевые сверла и конические зенкеры с алмазами, закрепленными на рабочей поверхности гальваническим методом или оснащенными алмазно-твердосплавными пластинами АТП (зенкеры).

Применение алмазных сверл и зенкеров позволило:

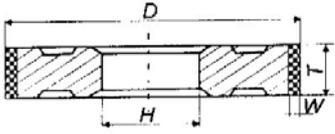
- повысить срок службы инструмента по сравнению с применением лезвийного быстрорежущего и твердосплавного инструмента в 5 ... 12 раз (в зависимости от обрабатываемого материала);
- увеличить производительность обработки в 3...9 раз;
- повысить стойкость зенкеров в 7 ... 8 раз по сравнению с твердосплавными.

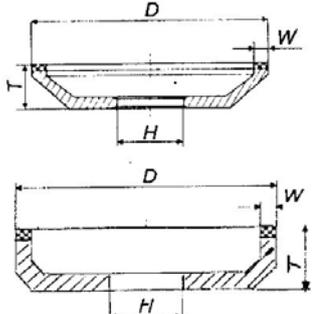
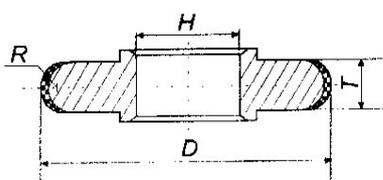
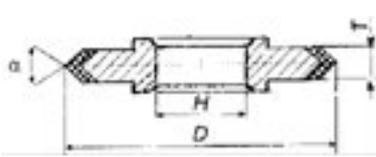
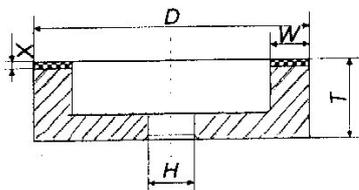
Высокопроизводительные алмазные инструменты для обработки керамики, сортового и художественного стекла форм: 1А1R, 1А1, 12А2-45°, 1ЕЕ1, 1FF1, 14ЕЕ1, 6А2Т изготавливаются в основном на металлической связке марки М2-01 из алмазов марок АС6 и АС15. Круги с такими характеристиками рабочего слоя не удовлетворяют потребителей как по производительности, так и по качеству обрабатываемых поверхностей.

Разработаны алмазные инструменты на принципиально новой металлической связке МХ5, представляющей собой композит, основу которого составляют компоненты классической металлической связки М2-01, а в качестве добавок используются специальные функциональные наполнители. Для операций шлифования и резки применяются алмазы марки АС65 зернистостью 200/160, которые ранее для этой цели не использовались. В табл. 3 приведены характеристики алмазного инструмента, выпускаемого на новых связках с высокопрочными алмазами.

Таблица 3

Назначение и характеристики алмазных кругов на металлической связке марки МХ5 для обработки керамики, стекла и хрусталя

Наименование кругов	Эскиз	Основные размеры, мм	Назначение и характеристика кругов
1	2	3	4
Круги алмазные отрезные формы 1А1R		D = 250; 320; 400 T=2,2 H = 32; 76 W = 5	Резка изделий из керамики и стекла: связка МХ5-5; алмазы АС65 200/160 (160/125); концентрация 25,50,100%

1	2	3	4
Круги алмазные шлифовальные формы 12A2-45°		$D = 150-250$ $W = 10; 20$ $H = 32; 51$ $T = 52$	Шлифование изделий из керамики (АС 32 160/125) и стекла (АС65 200/160); связка МХ5-10; концентрация 50, 100%
Круги алмазные шлифовальные формы 1EE1		$D = 150; 200; 250$ $H = 32; 60$ $T = 12; 20$ $\alpha = 90^\circ, 105^\circ, 110^\circ, 130^\circ$	Фасонное шлифование стекла: связка МХ5-5(7); алмазы АС15 160/125. 80/63 и АСМ 40/28; концентрация 35(50)%
Круги алмазные шлифовальные формы 1FF1		$D = 100; 150; 200$ $H = 32; 42$ $T = 20; 30$ $R = 20$	Фасонное шлифование стекла: связка МХ5-5(7); алмазы АС15 200/160 и АСМ 60/40; концентрация 50%
Круги алмазные шлифовальные формы 14EE1		$D = 250$ $H = 32$ $T = 10$ $A = 110^\circ$	Фасонное шлифование стекла: связка МХ5-5(7); алмазы АС15 80/63; концентрация 30(50)%
Круги алмазные шлифовальные формы 6A2T		$D = 100-600$ $H = 18; 20; 58; 100$ $T = 30$ $X = 3$	Шлифование плоских поверхностей изделий из керамики и стекла: связка МХ5-10; алмазы АС6 50/40; концентрация 50%

Испытания, проведенные на ряде фирм Чехии, Польши, Украины и России, показали, что по работоспособности (производительности шлифования, стойкости инструмента, шероховатости обработанной поверхности) круги на связке МХ5 в 1,3...2,0 раза превосходят круги аналогичных форм на связке М2-01 и равнозначны кругам западных фирм. Корпуса кругов 1EE1 и 1FF1 выполняются из двух сопряженных колец: наружного стального и внутреннего алюминиевого, что позволило уменьшить массу кругов (особенно больших диаметров) и исключить коррозионное воздействие воды на зону контакта посадочного отверстия круга с базовой поверхностью вала (шпинделя) станка.

В нефтяной, химической и других отраслях промышленности эксплуатируются насосы, работающие в абразивной и коррозионной средах. Ресурс работы таких насосов определяется, в основном, герметичностью клапанов. На основе новых гетерофазных материалов и технологии прецизионной алмазной обработки разработаны клапаны типа “шар-седло” из оригинальных керамических материалов на основе карбидов бора, хрома и других элементов. Техническая характеристика клапанной пары: диаметр шара, мм - 10 – 60; твёрдость, HRC: шара - 85 – 100, седла – 40 – 60. Характеристика функциональных поверхностей шара, мкм: точность не ниже - 0,5, шероховатость по параметру R_a , не более - 0,03. Клапаны обеспечивают работоспособность насосов не менее одного года, снижают в 2 – 3 раза стоимость эксплуатационных затрат, связанных с заменой клапанов, улучшают условия труда.

Таким образом, представленные научно-технические разработки являются конкурентоспособными на мировом рынке, характеризуются новизной конструкций и применением новых алмазо- и кубонитосодержащих композитов (связок), обладают высокими эксплуатационными характеристиками.

Литература: 1. Новиков Н.В., Шепелев А.А. Современные технологии обработки и инструменты из сверхтвёрдых материалов в машино- и приборостроении. //Инструментальный світ – 2001 - № 10 – 11. 2. Шепелев А.А., Поладко Е.П., Рябченко С.В. и др. Высокопроизводительные алмазные инструменты концерна «АЛКОН» для обработки керамики, сортового и художественного стекла. // Инструментальный світ –2004 - №4 (24).

УДК 621.901

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ЗАТОЧКЕ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Усов А.В., докт. техн. наук, **Якимова О.А.** (г. Одесса, Украина)

A temperature field study in the gore-form parts grinding. A temperature calculation method for gore-form parts is given. It is showed that in the rib region the temperature field essentially differs from that in a massive part. A tie between the cutter life and the gore rib temperature is established

Для увеличения стойкости режущих инструментов необходимо решить проблему сохранения исходного состояния поверхностного слоя материала при заточке. Эта проблема может быть решена, если найти способ управления теплонпряженностью процесса заточки. Режущие инструменты имеют клиновидную форму. Стойкость режущих инструментов зависит от сохранения стойкости режущей кромки - ребра клина. Из работ [3, 4, 5, 7] известно, что на режущей кромке резцов (ребре клина) возникает при заточке наибольшая температура.

Следовательно, для управления качеством поверхностного слоя детали клиновидной формы надо уметь рассчитывать температуру на ребре клина.

Расчету температур при шлифовании деталей клиновидной формы посвящены работы Сипайло В.А.[3], Якимова А.В. [5, 6] и других. Однако, в известных работах рассмотрена тепловая схема с тепловым источником, перемещающимся вдоль ребра клина. При заточке резцов, шлифовании газотурбинных лопаток широким кругом на станках ХТ-65, ХТ-116 и другими, тепловой источник двигается в направлении ребра клина. Такая задача в технической литературе не рассматривалась. Данная статья посвящена этому важному, мало изученному вопросу.

Шлифование является одним из более распространенных видов финишной обработки. Вместе с известными достоинствами: высокой точностью, чистотой - ему

свойственны и некоторые существенные недостатки. Установлено, что механическая энергия шлифовального станка почти полностью переходит в тепло, которое перераспределяется между изделием, стружкой, абразивным кругом и средой. Так как тепловая активность изделия обычно много выше, чем у круга, то основное тепло идет в деталь. Это приводит к нагреву шлифуемой поверхности до высоких температур, зачастую превышающих температуры фазовых и структурных превращений.

В результате нагрева шлифуемой поверхности до высоких температур в поверхностном слое появляются шлифовочные прижоги, микротрещины, коробления и другие дефекты. Поэтому изучение тепловых явлений при шлифовании, умение управлять ими необходимо при назначении режимов обработки и является одной из основных частей общего технологического исследования с целью повышения качества и надежности изделия.

Температурное поле распространяется в деталь на незначительную глубину (не более 1 мм). Поэтому большую часть шлифуемых деталей можно считать полубесконечным телом.

В практике металлообработки встречаются и такие детали, которые нельзя считать полубесконечным телом. Например, лопатки газовых турбин, представляющие в некотором приближении клин с малым углом раствора, в области близкой к углу

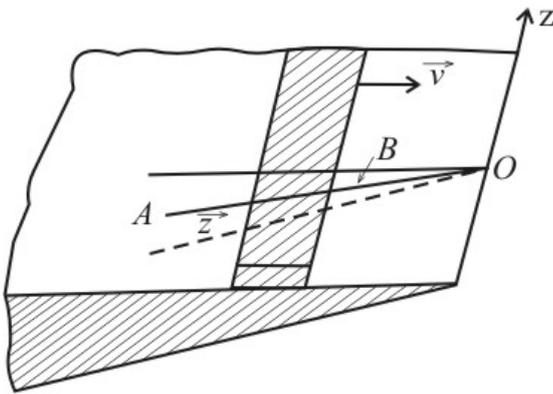


Рис.1. Расчетная тепловая схема.

клина, являются достаточно тонкими для того, чтобы повлиять на характер температурного поля. Кроме того, при общепринятой схеме шлифования лопаток газовых турбин тепловой источник движется так, как показано на рис. 1. В этом случае тепловая задача становится нестационарной, т.е. температурное поле будет меняться со временем в любой системе координат.

Для математического описания поставленной задачи примем следующую тепловую схему. Имеется клин с углом раствора α . Грани клина не пропускают тепла. По одной из них движется бесконечно длинный полосатый источник шириной l , в направлении, показанном на рис. 1. Плотность теплового потока q считаем равномерно распределенной по поверхности источника. При этих условиях задача может быть сформулирована и решена с наибольшим успехом в цилиндрической системе координат, начало которой выгоднее всего поместить на ребре клина.

Математически задача формулируется следующим образом.

Требуется решить дифференциальное уравнение

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + V \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1)$$

с начальными и краевыми условиями

$$T|_{t=0} = 0, \quad \frac{\lambda}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0, r'+l > r > r'} = q = const; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0, r'+l < r < r'} = 0; \quad T|_{\theta=\alpha} = 0.$$

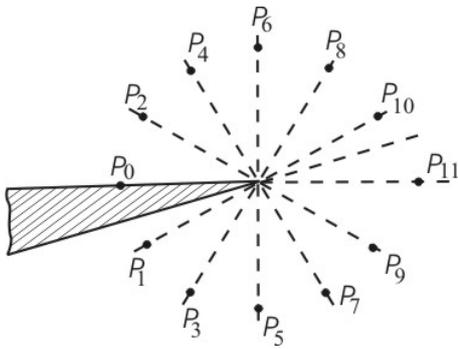


Рис.2.Схема отражений источников.

Известно, что в цилиндрической системе координат в неограниченном теплопроводящем пространстве температурное поле мгновенного точечного источника интенсивностью Q будет описываться функцией

$$T = \frac{Q}{c\gamma(4\pi at)^{3/2}} \exp\left[-\frac{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos \theta + (z - z')^2}{4at}\right], \quad (3)$$

которая является фундаментальным решением уравнения теплопроводности. В рассматриваемом случае клина для учета не пропускающей тепла границы $\theta=0$ необходимо удвоить интенсивность источника и сделать ее равной $2Q$. Для учета влияния не пропускающей тепла грани $\theta=\alpha$ необходимо поместить источник интенсивностью $2Q$ в точке P_1 с координатами $r', z', 2\alpha$. Для учета влияния границы $\theta=0$ на тепловой поток, созданный источником, расположенным в точке P_1 , необходимо поместить такой же источник в точке P_2 с координатами $r', z', -2\alpha$ и т.д. Каждый из источников является зеркальным изображением предыдущего в соответствующей плоскости. Нетрудно видеть, что цикл изображений завершится после того, как мы построим π/α таких источников.

Фундаментальное решение для рассматриваемого клина будет выглядеть как сумма π/α источников интенсивностью $2Q$:

$$T = \sum_{n=0}^{\frac{\pi}{\alpha}-1} \frac{2Q}{c\gamma(4\pi at)^{3/2}} \exp\left[\frac{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\theta - 2\alpha n) + (z - z')^2}{4at}\right]. \quad (4)$$

Введем в рассмотрение плотность теплового потока q , представляющую собой количество тепла, вводимого в изделие в единицу времени через единицу площади. Тогда интенсивность источника Q может быть представлена как $Q=qdr'dz'dt'$.

Кроме того, необходимо учесть, что рассматриваемый источник движется, как показано на рис. 1, и его координата r' непрерывно меняется. Если в некоторый момент времени t источник имеет координаты $(r', z', 0)$, то в момент времени t' его координаты могут быть представлены как $[r'+v(t-t'), z', 0]$.

Таким образом, температура в любой точке клина в момент времени t , обусловленная выделением в момент времени t' количества тепла, равного $qdr'dz'dt'$, будет равна

$$dT = \sum_{n=0}^{\frac{\pi}{\alpha}-1} \frac{2qdr'dz'dt'}{c\gamma[4\pi a(t-t')]^{3/2}} \exp\left\{-\frac{r^2 + [r'+v(t-t')]^2 - 2r[r'+v(t-t')] \cos(\theta - 2\alpha n) + (z - z')^2}{4a(t-t')}\right\}. \quad (5)$$

Доказано, что при шлифовании температурное поле быстро достигает состояния теплового насыщения (стационарного состояния) [6]. Это время в зависимости от режима колеблется в пределах 10^{-3} - 10^{-4} сек и в этом случае практически температурное поле для любого режима является стационарным, не зависящим от времени. Если ограничиться рассмотрением именно такого случая, то окончательное решение задачи можно получить путем интегрирования выражения (5) по t' от нуля до бесконечности, по z' от $-\infty$ до $+\infty$ и по r' от r' до $r'+l$, где l - ширина полосового источника.

Произведем интегрирование в указанных пределах

$$T = \sum_{n=0}^{\pi-1} \int_{-\infty}^{\infty} dz' \int_{r'}^{r'+l} dr' \int_0^{\infty} \frac{2qdt'}{c\gamma[4\pi a(t-t')]^{3/2}} \times \exp\left\{-\frac{r^2 + [r' + v(t-t')]^2 - 2r[r' + v(t-t')] \cos(\theta - 2\alpha n) + (z-z')^2}{4a(t-t')}\right\}. \quad (6)$$

После некоторых преобразований выражение (6) можно представить в виде

$$T = \sum_{n=0}^{\pi-1} \int_{-\infty}^{\infty} dz' \int_{r'}^{r'+l} dr' \int_0^{\infty} \frac{2qdt'}{c\gamma[4\pi a(t-t')]^{3/2}} \times \exp\left\{-\frac{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\theta - 2\alpha n) + (z-z')^2}{4a(t-t')} - \frac{r'v - rv \cos(\theta - 2\alpha n)}{2a} - \frac{v^2(t-t')}{4a}\right\} =$$

$$= \sum_{n=0}^{\pi-1} \int_{-\infty}^{\infty} dz' \int_{r'}^{r'+l} dr' \exp\left\{-\frac{v}{2a}[r' - r \cos(\theta - 2\alpha n)]\right\} \int_0^{\infty} \frac{2qdt'}{c\gamma[4\pi a(t-t')]^{3/2}} \times \exp\left\{-\frac{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\theta - 2\alpha n) + (z-z')^2}{4a(t-t')} - \frac{v^2(t-t')}{4a}\right\}. \quad (7)$$

Обозначим $R^2 = r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\theta - 2\alpha n) + (z-z')^2$ и введем новую переменную

$$\varepsilon = \frac{R}{2\sqrt{a(t-t')}} , \quad d\varepsilon = \frac{Rdt'}{4\sqrt{a}(t-t')^{3/2}} .$$

После подстановки выражение (7) сведется к известному интегралу:

$$\sum_{n=0}^{\pi-1} \int_{-\infty}^{\infty} dz' \int_{r'}^{r'+l} dr' \exp\left\{-\frac{v}{2a}[r' - r \cos(\theta - 2\alpha n)]\right\} \int_0^{\infty} \frac{q}{R\lambda\pi^{3/2}} \exp\left[-\varepsilon^2 - \frac{v^2 R^2}{16a^2 \varepsilon^2}\right] d\varepsilon =$$

$$= \sum_{n=0}^{\pi-1} \int_{-\infty}^{\infty} dz' \int_{r'}^{r'+l} \frac{q}{4\pi\lambda R} \exp\left\{-\frac{v}{2a}[R + r' - r \cos(\theta - 2\alpha n)]\right\} dr' . \quad (8)$$

Произведя интегрирование выражения (8) по dz' , получим

$$T = \sum_{n=0}^{\pi-1} \int_{r'}^{r'+l} dr' \int_{-\infty}^{\infty} \frac{qdz'}{4\pi\lambda\sqrt{\rho^2 + (z-z')^2}} \exp\left\{-\frac{v}{2a}\left[\sqrt{\rho^2 + (z-z')^2} + r' - r \cos(\theta - 2\alpha n)\right]\right\} =$$

$$= \sum_{n=0}^{\frac{\pi-1}{\alpha} r'+l} \int_{r'}^{r'+l} dr' \frac{q}{4\pi\lambda} \exp\left\{-\frac{v}{2a}[r' - r \cos(\theta - 2\alpha n)]\right\} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dz'}{\sqrt{\rho^2 + (z-z')^2}} \exp\left\{-\frac{v\sqrt{\rho^2 + (z-z')^2}}{2a}\right\}. \quad (9)$$

Здесь $\rho^2 = r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\theta - 2\alpha n)$.

Внутренний интеграл выражается через модифицированную функцию Бесселя второго рода, нулевого порядка, т.е.

$$T = \sum_{n=0}^{\frac{\pi-1}{\alpha} r'+l} \int_{r'}^{r'+l} \frac{qdr'}{4\pi\lambda} \exp\left\{-\frac{v}{2a}[r' - r \cos(\theta - 2\alpha n)]\right\} \cdot K_0 \left[\frac{v}{2a} \sqrt{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\theta - 2\alpha n)} \right]. \quad (10)$$

Вынесем первый член этой суммы за скобу и поменяем порядок суммирования и интегрирования

$$T = \int_{r'}^{r'+l} \frac{qdr'}{2\pi\lambda} \exp\left\{-\frac{v}{2a}[r' - r \cos \theta]\right\} \cdot K_0 \cdot \left[\frac{v}{2a} \sqrt{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos \theta} \right] \times \\ \times \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\frac{\pi-1}{\alpha}} \frac{\exp\left\{-\frac{v}{2a}[r' - r \cos(\theta - 2\alpha n)]\right\} \cdot K_0 \cdot \left[\frac{v}{2a} \sqrt{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\theta - 2\alpha n)} \right]}{\exp\left\{-\frac{v}{2a}(r' - r \cos \theta)\right\} \cdot K_0 \cdot \left[\frac{v}{2a} \sqrt{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos \theta} \right]} \right\}. \quad (11)$$

Теперь интеграл перед фигурной скобкой представляет собой известную функцию [1], описывающую температурное поле, создаваемое бесконечно длинным полосовым источником с той разницей, что эта функция выражена в цилиндрических координатах, связанных с теплопроводящим телом, а не с источником. Выражение в фигурных скобках характеризует ту поправку, которую вносит ограниченность изделия.

Введем безразмерные комплексы

$$\frac{vr'}{2a} = \rho'; \quad \frac{vr}{2a} = \rho; \quad \frac{vl}{2a} = L$$

и перепишем выражение (11) в безразмерной форме

$$T = \int_{\rho'}^{\rho'+L} \mu(\rho, \rho', \theta, \alpha) \frac{qd\rho'}{2\pi\lambda} \exp(-\rho' + \rho \cos \theta) \cdot K_0 \cdot \sqrt{\rho^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho' \cos \theta}. \quad (12)$$

В этой формуле множитель μ , зависящий от безразмерных параметров ρ и ρ' , а также от углов θ и α , характеризует влияние формы шлифуемого изделия. По виду формулы можно заключить, что температура в области, близкой к ребру клина (в области малых значений ρ) будет сильно зависеть прежде всего от угла раствора клина α , от положения исследуемой точки относительно поверхности, т.е. от угла θ , а также от того, где в данный момент находится исследуемая точка относительно начала координат и относительно источника, т.е. от ρ и ρ' .

Из анализа множителя

$$\mu(\rho, \rho', \theta, \alpha) = 1 + \sum_{n=1}^{\frac{\pi-1}{\alpha}} \frac{\exp[\rho \cos(\theta - 2\alpha n)] \cdot K_0 \cdot \sqrt{\rho^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho' \cos(\theta - 2\alpha n)}}{\exp(\rho \cos \theta) \cdot K_0 \cdot \sqrt{\rho^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho' \cos \theta}} \quad (13)$$

видно, что его значение на ребре клина не зависит от положения источника и выра-

жается просто числом равным π/α . Во всех остальных случаях значения множителя μ обуславливаются положением источника и достигают максимума при $\rho' = 0$, т.е. когда источник находится на ребре клина. Зависимость множителя μ от ρ , θ и α в этом случае выразится простой формулой

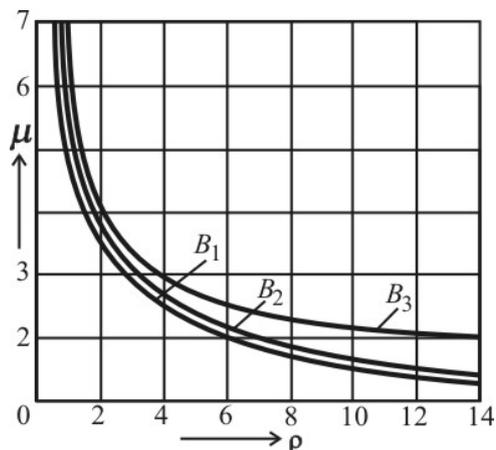


Рис. 3. Зависимость множителя μ от ρ при значениях: $\theta_1=0$; $\theta_2=\pi/24$; $\theta_3=\pi/12$ и $\alpha=\pi/12$.

$$\mu(\rho, \theta, \alpha) = 1 + \sum_{n=1}^{\frac{\pi}{\alpha}-1} \frac{\exp[\rho \cdot \cos(\theta - 2\alpha n)]}{\exp(\rho \cdot \cos \theta)}. \quad (14)$$

Зависимость множителя μ от ρ при трех значениях θ и $\alpha=\pi/12$ показана на рис. 3.

Экспериментальная проверка полученных результатов производилась на установке, описанной [2], с некоторыми изменениями. В качестве исследуемого образца ставился клин, вырезанный из стали 12Х2Н4А толщиной 2 мм, с углом раствора $\alpha=\pi/12$. Боковые стороны теплоизолировались асбестом, чем достигалось моделирование бесконечно длинного клина с бесконечно длинным источником, как того требует расчетная тепловая схема (рис. 1).

Ввиду малой толщины клина для достижения надежного контакта образца с источником тепла в установке предусмотрена возможность перемещения клина в вертикальной плоскости и поворота плоскости его вокруг продольной оси.

Источник состоял из электрического нагревательного элемента, помещенного в металлический корпус. Для обеспечения постоянного теплового потока, вводимого в образец, корпус нагревателя в области контакта с поверхностью клина тщательно шлифовался и монтировался в асбоцементной плите, которая перемещалась по направляющим уголкам.

Источник с большой степенью равномерности перемещался штангой, соединенной с кареткой, укрепленной на многозаходном винте.

Установка позволяла изменять скорость перемещения источника в пределах от 0,2 до 10 мм /сек. Скорость перемещения источника тепла определялась путем измерения расстояния, ограниченного контактами реле и времени движения, фиксируемого секундомером, включенным в цепь реле.

Винт приводится в движение через редуктор двигателя, питаемого постоянным током. Температуры записывались потенциометрами (многоточечным и непрерывно пишущим). Датчиками служили хромель-копелевые термопары 0,2 мм. В каждом сечении располагалось по три термопары - на образующих клина и его биссектрисе. Для записи температуры было выбрано три сечения на расстоянии соответственно 24; 12 и 3 см от ребра клина. Монтировалась одна термопара на ребре клина. Через пакетный переключатель (с посеребренными контактами) термопары соединялись с потенциометрами, которые включались на определенных расстояниях от сечений. Сочетания мощности и скорости соответствовали задаче полубесконечного тела. Температура на ребре клина равна 120°C, а на расстоянии 3 см от ребра 80 °C..

Выводы: 1. Установлено, что значение множителя $\mu(\rho, \rho', \theta, \alpha)$ на ребре клина не зависит от положения источника и выражается числом равным π/α . 2. Установлено, что на ребре клина с углом $\alpha=\pi/12$, изготовленного из стали 12Х2Н4А темпера-

тура на ребре клина возрастает на 66% по сравнению с участками расположенными на расстоянии 3 см от ребра.

Литература: 1. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел.– М., изд. «Наука», 1964. 2. Сипайлов В.А., Ханжин Н.Н., Ярмонов Н.А. Исследование температурного поля в пластине конечной толщины. Сборник научных трудов. Физико-математические науки. Пермь, ППИ, 1967. 3. В.А. Сипайлов Тепловые процессы при шлифовании и управлении качеством поверхностного слоя.– М.: Машиностроение, 1978.–167с. 4. А.А. Якимов Технологические основы обеспечения и стабилизации качества поверхностного слоя при шлифовании зубчатых колес. Одесса. «Астропринт», 2003. – 452с. 5. Основы теории тепловых явлений при шлифовании деталей машин. Учебн. пособие./ А.В. Якимов, Б.О. Ткаченко, С.Г. Зимин, А.А. Якимов, Н.И. Решетнев, А.М. Шинтасов, В.П. Ларшин/ Одесса: ОГПУ, 1997. – 278с. 6. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. : М, Машиностроение. 1975.– 176с. 7. Тепловые процессы при обычном и прерывистом шлифовании. Учебн. пособие./А.В. Якимов, Б.О. Ткаченко, С.Г. Зимин, А.А. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков/ Одесса: ОГПУ. 1998.– 272с.

УДК 621.952.5

КОМПЕНСАЦИЯ РАЗМЕРНОГО ИЗНОСА РЕЗЦОВ ПРИ РАСТАЧИВАНИИ ОТВЕРСТИЙ ЦИЛИНДРОВ ТЕРМОПЛАСТАВТОМАТОВ

Линчевский П.А., докт. техн. наук, проф., **Буюкли И.М.**, канд. техн. наук, **Иоргачев В.Д.** (г. Одесса, Украина)

A new construction of the cutting and deforming instrument applied at treatment of the deep openings is resulted in the article, providing high exactness of longitudinal type of openings and degree of plastic deformation even on length.

Характерной особенностью толстостенных цилиндров пластификационных узлов машин для литья пластмасс под давлением, является значительная длина обрабатываемых в них отверстий (20-30 диаметров), что обеспечивает необходимое распределение температуры, снижает обратный поток расплавленной пластмассы и создает равномерное давление в пресс-форме [1]. К рабочим поверхностям таких цилиндров предъявляются высокие требования по точности размеров и формы, а также износостойкости. Технологический процесс обработки глубоких отверстий в цилиндрах, как правило, включает отдельные или совмещенные операции растачивания и пластического деформирования поверхностей. Главным недостатком процесса растачивания является размерный износ резцов, что приводит к появлению конусности отверстий и к последующей неравномерной пластической деформации поверхности. Это в свою очередь может привести к неравномерному износу цилиндра в процессе эксплуатации и к нарушению показателей качества работы термопластавтомата. В связи с этим целью настоящей работы было создание нового инструмента, позволяющего выполнять компенсацию размерного износа резцов при растачивании.

Известно, что при обработке глубоких отверстий используются расточные головки, снабженные двухрезцовым плавающим блоком (разверткой) и опорными направляющими элементами.

Основными недостатками указанных расточных головок являются ограниченная режущая способность и низкая точность, обусловленная размерным износом.

Эти недостатки частично устранены в конструкции расточной головки, которая описана в авторском свидетельстве [2].

В этой конструкции число режущих элементов равно четырем (возможно и большее число), что примерно в два (и более – при большем числе режущих элементов)

раз повышает режущую способность. Одновременно в конструкции предусмотрена автоподналадка размерного износа режущих элементов, что существенно повышает точность обработки. Конструктивно указанные преимущества достигаются за счет размещения в пазах корпуса расточной головки с возможностью радиального перемещения режущих и направляющих элементов и взаимодействия через подпружиненный двойной клиновый элемент между собой и поверхностями пазов. При этом компенсация размерного износа осуществляется следующим образом. Направляющие элементы, отслеживая изменение диаметрального размера вследствие размерного износа, радиально перемещаются к центру расточной головки и через двойные клиновые элементы вынужденно выдвигают режущие элементы на больший (в пределах размерного износа) диаметральный размер обработки.

Однако, при таком конструктивном исполнении имеет место силовое замыкание как в прямом (направляющий элемент → двойной клиновый элемент → режущий элемент), так и в обратном направлении (режущий элемент → двойной клиновый элемент → направляющий элемент). То есть, система находится в равновесном положении только при равенстве сил на режущем и направляющем элементах и, более того, система автоматически самоуравновешивается. При изменении усилия на одном из элементов, например на режущем в результате затупления, точно такое же усилие, в виде реакции обработанной поверхности, появится на направляющем элементе. Необходимо отметить, что при указанном выравнивании усилий имеет место инертность системы и «порог» срабатывания, обусловленный силами трения. В процессе резания, при циклических колебаниях усилий на режущем элементе (переменные припуск, жесткость, твердость обрабатываемой поверхности, наростообразование и пр.), превышающих «порог» срабатывания системы, неизбежно появятся автоколебания, амплитуда которых будет находиться в пределах упругих контактных деформаций в подвижных соединениях. То есть, конструкция не является виброустойчивой.

Другим недостатком является отсутствие непосредственного силового замыкания диаметрально расположенных режущих элементов, что снижает точность диаметрального размера обработки.

Следующий недостаток конструкции заключается в том, что полная компенсация размерного износа при обработке одной детали невозможна, поскольку продольное перемещение двойного клинового элемента под действием пружины не может быть осуществлено из-за наличия сил трения, обусловленных натягом в системе. Постоянный натяг в системе обеспечивается силами резания. Если же усилие пружины будет большим, чем силы трения в системе, то двойной клиновый элемент переместится в осевом направлении в крайнее положение и выдвинет режущий элемент не на «остаточную» величину размерного износа (полная величина размерного износа изначально распределяется примерно поровну между режущим и направляющими элементами), а на максимально возможную, то есть большую, чем требуемый размер обработки. То есть система станет неработоспособной.

Указанные недостатки существенно ограничивают область применения известной расточной головки [3].

Предлагаемая новая конструкция расточной головки [4] выполнена таким образом, что режущие и направляющие элементы подвижно размещены в радиальных пазах корпуса с возможностью взаимодействия между собой посредством клиновых

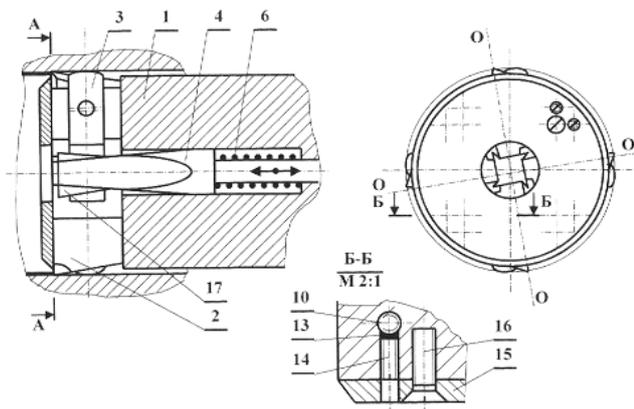


Рис. 1. Расточная головка.

элементов. При этом, каждый режущий элемент взаимодействует с другими режущими элементами через общий для всех режущих элементов клиновидный элемент и, одновременно, через автономный клиновидный элемент с направляющим элементом, размещенном в смежном, по направлению вращения головки, пазу.

При таком исполнении радиальные усилия резания на режущих элементах взаимно компенсируются через общий клиновидный элемент и не передаются обратно на направляющие элементы. Это повышает диаметрально жесткость режущих элементов и, соответственно, точность обработки, а также исключает возникновение радиальных автоколебаний режущих и направляющих элементов в условиях циклических изменений сил резания.

На рис. 1 изображена предлагаемая конструкция расточной головки с четырьмя режущими и четырьмя направляющими элементами, общий вид; на рис. 4 – разрез А-А рис. 1. Кроме того, на рис. 2 и 3 изображены аналогичные поперечные разрезы, соответственно, для случаев двух и трех комплектов направляющих и режущих элементов. При этом общие виды для этих случаев не представлены. Они аналогичны общему виду на рис. 1.

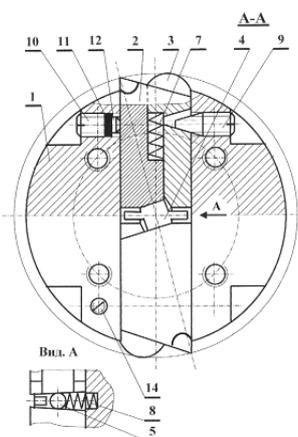


Рис. 2. Головка с двумя резами.

Расточная головка содержит цилиндрический корпус 1, в радиальных пазах которого подвижно установлены режущие 2 и направляющие 3 элементы. Каждый режущий элемент установлен с возможностью взаимодействия с другими режущими элементами через общий для всех режущих элементов осевой клиновидный элемент 4 и, одновременно, через автономные клиновидные элементы 5 с направляющими элементами, размещенными в смежном по направлению вращения головки пазах. Осевой клиновидный элемент, автономный клиновидный элемент и режущие с направляющими элементами подпружинены соответственно пружинами 6, 7 и 8. Расточная головка снабжена регулировочными винтами 9, взаимодействующими с направляющими элементами 3, а также прижимными винтами 10, взаимодействующими через упругие прокладки 11 и толкатели 12 с режущими элементами 2. Все указанные винты стопорятся через пластиковые прокладки 13 стопорными винтами 14. Радиальные пазы (из соображений технологичности) выполнены открытыми со стороны торца корпуса расточной головки и геометрически замыкаются крышкой 15, которая крепится к торцу головки винтами 16. Автономные клиновидные элементы 5 выполнены в виде тел качения (возможен вариант исполнения в виде клина), а клиновидные опорные поверхности режущего и направляющего элементов с которыми они контактируют образуют острый угол, меньший угла трения скольжения. Осевой клиновидный элемент 4 выполнен в виде вала концентрично расположенного в отверстии корпуса расточной головки с возможностью осевого перемещения под дей-

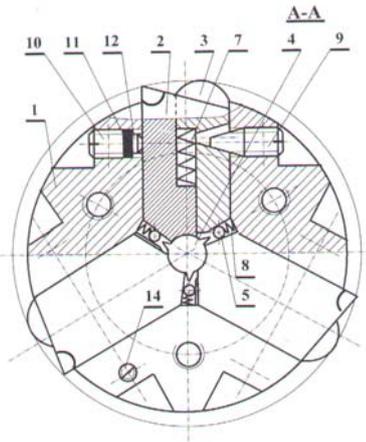


Рис.3. Головка с тремя режущими.

Расточная головка работает следующим образом. Перед обработкой направляющие и режущие элементы настраиваются на размер обработки. Контроль за размером настройки осуществляется известными способами, например, посредством микронного индикатора, либо иного измерительного прибора. Направляющие элементы 3 настраиваются на размер обработки каждый в отдельности посредством регулировочных винтов 9. Режущие элементы 2 изначально и при переточках изготавливаются с идентичными геометрическими размерами (особо – вдоль линий О-О) и на размер обработки выводятся синхронно посредством принудительного осевого перемещения клинового элемента 4, которое через клиновое сопряжение преобразуется в радиальное перемещение режущих элементов.

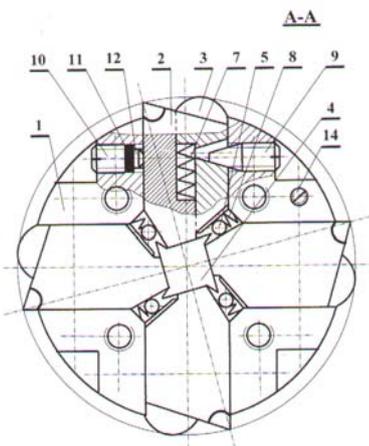


Рис.4. Разрез А-А по рис.1.

Осевое перемещение клинового элемента 4 может осуществляться любым из известных приводов малых перемещений (на рис. не изображен). В случаях, когда такой привод из конструктивных соображений невозможен, либо его применение затруднено, возможно конструктивное исполнение расточной головки с регулировочными винтами для режущих элементов идентичных регулировочным винтам направляющих элементов. Тогда и настройка на размер обработки режущих и направляющих элементов будет также идентичной, но с учетом направления действия усилия пружины 7.

Настроенную на размер обработки расточную головку вводят в обрабатываемое отверстие и осуществляют съём припуска. При этом происходит размерный износ режущих лезвий и, соответственно, уменьшается диаметр растачиваемого отверстия заготовки, что приводит к увеличению давления обработанной поверхности на направляющие элементы 3. Когда радиальное усилие от давления обработанной поверхности на направляющие элементы превысит «пороговое» значение (определяется силами трения покоя элементов 2, 3 и 5 между собой и поверхностью пазов расточной головки, а также жесткостью пружины 7), направляющие элементы скачкообразно переместятся радиально к центру растачиваемого отверстия. При этом перемещении направляющие элементы своими клиновыми опорными поверхностями воздействуют на тела качения 5, которые, в свою очередь, воздействуют на клиновые опорные поверхности режущих элементов, расположенных в смежных пазах корпуса, вынуждая их радиально перемещаться в сторону увеличения диаметрального размера. Радиальное перемещение режущих элементов приводит к образованию зазора между

их опорными поверхностями и клиновым элементом 4. Последний, освобожденный таким образом от удерживающих его сил трения, перемещается в осевом направлении под воздействием пружины 6 до момента силового замыкания режущих элементов вдоль линий О-О. Далее обработка осуществляется на восстановленном (исходном) диаметральном размере растачиваемого отверстия. Поскольку направляющие элементы по отношению к режущим элементам конструктивно выполнены со сдвигом в осевом и окружном положении, то они достигнут зоны восстановленного диаметального размера с задержкой во времени. Но, в момент достижения зоны восстановленного диаметального размера направляющие элементы под действием пружин 7 радиально переместятся на новый диаметальный размер, но не больший, чем исходный настроечный. При этом увеличится расстояние между клиновыми опорными поверхностями направляющих и режущих элементов, которое компенсируется за счет соответствующих перемещений клиновых элементов 5 под воздействием пружин 8. Затем цикл процесса компенсации износа режущих элементов повторяется.

В описанной конструкции жесткость пружин 7 рассчитывается таким образом, чтобы исключить самопроизвольное перемещение клиновых элементов 4 и 5 под воздействием соответственно пружин 6 и 8.

По окончании обработки в случаях, когда требуется безрисочный отвод режущих элементов, клиновый элемент 4 посредством привода перемещается в крайнее правое положение (по рис. 1). При этом клиновые ребра входят в контакт с клиновыми элементами 5 и возвращают их в исходное положение. Это дает возможность режущим элементам под действием пружин 7 переместиться радиально в сторону уменьшения диаметального размера, что дает возможность безрисочного отвода. Направляющие же элементы, удерживаемые усилием пружины 7, остаются на исходном (настроечном) размере и тем самым обеспечивают соосность расточной головки и растачиваемого отверстия при выводе. Если же риска на обработанной поверхности допустима, то возврат в исходное положение клиновых элементов необязателен. В предлагаемой конструкции направляющие элементы выполняют двойную функцию: функцию ориентации головки в обрабатываемом отверстии и функцию слежения за диаметральным размером обработки и корректировки последнего. При необходимости конструктивно, с целью повышения надежности ориентирования расточной головки в обрабатываемом отверстии могут быть предусмотрены дополнительные традиционные направляющие элементы.

Таким образом, предложенная конструкция расточной головки практически полностью устраняет влияние размерного износа резцов на точность продольного профиля обрабатываемых отверстий в цилиндрах. Данная расточная головка может быть использована как для раздельного растачивания отверстий под последующее пластическое деформирование, так и для совмещенной обработки, когда в одном инструменте вместе с этой головкой на одном стебле будет размещена роликовая раскатка. Глубокие отверстия в цилиндрах термопластавтоматов, обработанные таким инструментом будут строго соответствовать высоким эксплуатационным требованиям.

Литература: 1. Василюк Г.Д., Лещенко М.И., Мельничук П.П. Технологія обробки глибоких отворів циліндрів. – Житомир: ЖІТІ, 2000. – 304с. 2. А.с. 1398999 СССР, МКИ В23В 29/03. Расточная головка / Г.Д.Григорьян, Т.Г.Джугурян, С.А.Близнюк. – Бюл. – 1988. - № 20. – 5с. 3. Линчевский П.А., Джугурян Т.Г., Оргиян А.А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках. – К.: Техніка, 2001. – 300с. 4. Буюкли И.М., Джугурян Т.Г., Иоргачев В.Д., Линчевский П.А. Расточная головка. – Заявка на изобретение № а 2005 01682 от 23.02.2005.

**ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ МАСЛЯНЫХ КАРМАНОВ НА
ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ**

Линчевский П.А., докт. техн. наук, проф., **Новак Г.П.**, канд. техн. наук
(г. Одесса, Украина)

The method of causing of short and deep oily pockets on the internal surfaces of shells of combustion engines, which allows to save the sufficient volume of greasing on the surfaces of friction to the end of term of exploitation of engines, is described in the article.

В настоящее время проектные организации и промышленные предприятия располагают различными средствами повышения срока службы машин и механизмов. К ним относятся: использование новых износостойких материалов, разработка оптимальных технологических процессов обработки трущихся поверхностей, применение методов их химического и термического упрочнения, повышение смазочной активности масел, применение износостойких покрытий и т. д.

Среди применяемых решений, направленных на повышение эксплуатационных характеристик пар трения, особая роль принадлежит технологическим методам обработки поверхностей трения. Не изменяя конструкции машин и применяя одни и те же конструкционные материалы и смазки, технологическими методами обработки трущихся поверхностей можно значительно повысить как общую долговечность машин, так и межремонтные сроки их эксплуатации.

Эффективным технологическим методом повышения износостойкости любых поверхностей трения является получивший в последнее время широкое распространение метод нанесения на указанные поверхности регулярного или частично регулярного микрорельефа (РМР или ЧРМР). Как правило, для этого применяется наиболее изученный, совершенный и универсальный метод вибрационного накатывания.

Вместе с тем, в процессе эксплуатации тяжело нагруженных деталей, поверхности которых обработаны вибронакатыванием, первоначально полученный эффект сокращения интенсивности износа быстро утрачивается, что объясняется недостаточной глубиной получаемого ЧРМР для этих условий работы [1].

Напротив, существующие технологические способы лезвийного образования дискретных углублений или масляных карманов (МК) на поверхности трения обеспечивают достаточную их глубину. Однако, при всех применяемых схемах обработки, длина МК оказывается излишне большой. Так как с размерами масляных карманов функционально взаимосвязано управление качеством поверхности, то с увеличением их длины значительно сужаются технологические возможности изменения соотношения площади, занимаемой МК, и общей площади поверхностей трения. Возникают при этом и большие затруднения в формировании ЧРМР с переменными параметрами сетки МК для выравнивания разных темпов износа по участкам рабочей поверхности.

С целью устранения указанных недостатков разработан новый способ формирования МК на поверхности трения, основанный на применении схемы вихревого попутного фрезерования. Этот способ позволяет получать короткие карманы длиной 1,0 - 1,5 мм, глубиной 0,5 - 0,7 мм и шагом между ними порядка 2 - 4 мм. Способ является универсальным и пригоден для обработки МК на любых поверхностях трения. Здесь же приводится наиболее сложный вариант формирования

коротких и глубоких МК на внутренних цилиндрических поверхностях деталей типа гильз двигателей внутреннего сгорания [2,3,4].

На рис. 1 показана схема обработки внутренней цилиндрической поверхности гильзы фрезой, каждое из лезвий которой формирует единичный замкнутый МК при попутном резании. Зуб фрезы внедряет в металл в точке b_3 и при дальнейшем, сопутствующем детали, движении формирует МК.

При повороте детали на угол α_2 , а инструмента - на угол β формирование МК завершается. Линейная скорость зуба фрезы больше линейной скорости начальной точки на поверхности детали.

Разность линейных скоростей определяет одновременно скорости резания, внедрения зуба фрезы в металл (набора глубины) и круговой подачи. Следующий МК формируется аналогично очередным зубом фрезы.

Координаты расположения точек дна МК C_i на поверхности трения при планетарном и осевом поступательном формообразующих движениях инструмента относительно детали (рис.2) определяются уравнениями

$$X_i = a(m-1)\cos[2\pi(i-1)/(mn)] + (R_\phi - h)\cos[2\pi(i-1)(m-1)/(mn)]; \quad (1)$$

$$y_i = a(m-1)\sin[2\pi(i-1)/(mn)] - (R_\phi - h)\sin[2\pi(i-1)(m-1)/(mn)]; \quad (2)$$

$$z_i = 2\pi S_0(i-1)/(mn\omega), \quad (3)$$

где a – радиус подвижной центриды; $m=b/a$ – безразмерный параметр; b - радиус неподвижной центриды; n – число лезвий инструмента; S_0 – скорость осевой подачи вдоль оси z ; ω – орбитальная угловая скорость инструмента или детали; $i=1,2,\dots,k$ – порядковые номера точек возврата гипотроихиды (МК).

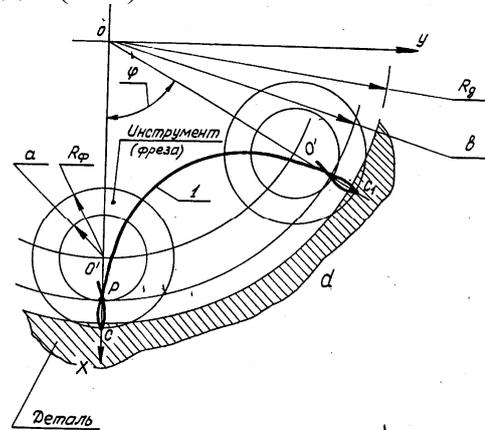
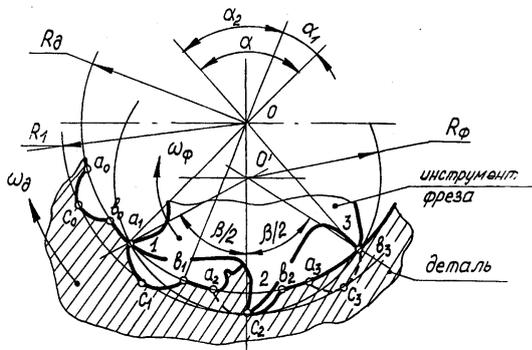


Рис.1.Схема обработки внутренней цилиндрической поверхности гильзы.

Рис.2. Схема планетарного формообразующего движения инструмента относительно оси.

Угловой шаг между соседними МК имеет вид:

$$\varphi_i = 2\pi(i-1)/(mn). \quad (4)$$

Безразмерный параметр m можно также определять по величине соотношения собственной ω_c и орбитальной ω угловых скоростей инструмента:

$$M = 1 + \omega_c / \omega. \quad (5)$$

Как следует из формул (1-5), взаимное расположение МК (вид с сетки) зависит от конструктивного исполнения режущих лезвий инструмента (их числа, расположения и формы) и режимных параметров (осевой влаци, угловой скорости инструмента и угловой скорости летали). При этом подача S_0 определяет частоту расположения МК в осевом направлении, а параметры m и n - в окружном.

Изменение параметра m одновременно с частотой МК изменяет и их длину l , определяемую выражением:

$$L = 2R_{\delta} \arccos \left\{ a(m-1) \cos \left\{ \left[\frac{1}{m} \arccos \left\{ \frac{R_{\delta}^2 - R_{\phi}^2 - a^2(m-1)^2}{[2a(m-1)R_{\phi}]} \right\} \right] \right\} + \right. \\ \left. + R_{\phi} \cos \left\{ \left[\frac{m-1}{m} \right] \cdot \arccos \left\{ \frac{R_{\delta}^2 - R_{\phi}^2 - a^2(m-1)^2}{[2a(m-1)R_{\phi}]} \right\} \right\} \right\} R_{\delta}. \quad (6)$$

Площадь поверхности единичного МК определяется по формуле:

$$S_n = \omega \int \int \left(\frac{1}{\sqrt{r^2 - z^2}} \right) \left\{ r^2 \left[\alpha^2(m-1)^2 + R_{\phi}^2 - 2\alpha R_{\phi}(m-1) \cos m\omega t \right] - \left[\alpha(m-1)z / 2 \right]^2 \right. \\ \left. \left[2 + \cos 2(m-2)\omega t - 3 \cos 2m\omega t \right] \right\}^{1/2} dz dt \quad (7)$$

где r - радиус закругления (формы) зуба фрезы; $z = S_0 t$; t - время.

Общая площадь поверхности трения, занимаемая МК $S_{ок}$ получается умножением площади единичного МК на их число, которое вычисляется по формуле:

$$k = L \omega m n / (2\pi S_0), \quad (8)$$

где L - длина поверхности трения (высота гильзы).

Объем единичного МК находится из выражения:

$$V = 2 \int_0^{z_1} S(z) dz, \quad (9)$$

где

$$S(z) = a^2(m-1)^2 [\omega t_1 - 0,5 \sin(2\omega t_1)] - R_{\phi}^2 \omega(m-1)t_1 + 0,5 R_{\phi}^2 \sin[2\omega(m-1)t_1] + a R_{\phi}(m-1) \\ \{ \sin[\omega(m-2)t_1] - (1-2/m) \sin(\omega t_1 / m) \}; \quad (10)$$

$$t_1 = \left[\frac{1}{m\omega} \right] \arccos \left\{ \frac{R_{\delta}^2 - a^2(m-1)^2 - R_{\phi}^2}{[2a(m-1)R_{\phi}]} \right\}, \quad (11)$$

где z_1 - половина ширины лезвия фрезы.

Анализ формул (6-11) показывает, что, изменяя параметры S_0 , m и n , можно технологически управлять маслоемкостью поверхности трения и, следовательно, темпом ее износа.

Установленные связи между относительной площадью, объемом МК и износостойкостью поверхностей трения позволяют управлять параметрами износа на основе простого уплотнения или разрежения сетки МК.

Литература: 1. Новак Г.В. Повышение износостойкости деталей машин технологическими методами. // Тез. докл. конф. «Ресурсо- и энергосберегающие технологии в машиностроении» - Одесса 5-7 сентября 1995. - С. 124-126. 2. Линчевский П.А., Новак Г.В., Варивода В.А. Повышение износостойкости тяжело нагруженных деталей на основе разработки теории и технологии нового способа формирования частично регулярного микрорельефа на поверхностях трения. // Известия Академии инженерных наук Украины. - 1997. - Спец. выпуск отделения «Тяжелого и транспортного машиностроения». - С. 17-25. 3. Линчевский П.А., Новак Г.В. Оптимизация параметров частично регулярного микрорельефа на поверхностях трения. // Известия Академии инженерных наук Украины. - 1998. - Спец. выпуск отделения «Тяжелого и транспортного машиностроения». - С. 169-175. 4. Линчевский П.А., Новак Г.В. Технологическое управление неравномерностью износа гильз двигателей внутреннего сгорания. // Журнал Ассоциации технологов-машиностроителей Украины «Сучасне машинобудування» № 1-2. - 2000. - С. 121-124.

ТОНКОЕ РАСТАЧИВАНИЕ ОТВЕРСТИЙ С ПРЕРЫВИСТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Линчевский П.А., докт. техн. наук, проф., Оргиян А.А., докт. техн. наук, проф.,
Онищенко С.М. (г. Одесса, Украина)

The character of vibrations and distinctive signs of the dynamic system at treatment of irregular surfaces are described in the article, the model of the closed dynamic system at the irregular cutting and calculations of its stability are resulted.

Тонкое растачивание как финишная операция часто выполняется на отверстиях с прерывистой поверхностью. Такая поверхность образуется при наличии пазов, выборок, а также при пересечениях обрабатываемого отверстия с другими. Периодическое повторение врезания и выхода инструмента является дополнительным возмущающим фактором, вызывающим при прерывистой резании колебания более высокого уровня, чем при непрерывном резании. Прерывистость обрабатываемой поверхности приводит к периодическому разрыву связей между элементами системы станка. Поэтому замкнутая динамическая система становится системой с переменными характеристиками. Если нарушить состояние равновесия такой системы, то будут совершаться своеобразные колебания: их нельзя назвать свободными, поскольку в системе периодически изменяется один из ее параметров; но их нельзя назвать вынужденными, так как внешнее воздействие не представляет собой возмущающей силы, а входит в составную часть уравнения движения. Такие динамические системы, в которых возбуждаются или усиливаются колебания за счет изменения их параметров, обычно называются параметрическими колебательными системами, а колебания - параметрическими.

В некоторых областях частот возбуждения амплитуды параметрических колебаний монотонно возрастают. Это явление параметрического резонанса опаснее обычного резонанса, который наступает только при одной частоте возмущающей силы и при любых, в том числе и нулевых начальных условиях.

Параметрический резонанс возникает при бесчисленном множестве значений частоты возбуждения в результате появления неизбежных начальных возмущений. При этом отношение частоты колебаний к частоте изменения параметра (p/w) может равняться $\frac{1}{2}; 1; \frac{3}{2}; 2; \frac{5}{2}$ и т.д.

Известно, что колебания при тонком растачивании консольными борштангами являются одним из существенных факторов, влияющих на точность обработки и ограничивающих технологические возможности отделочно-расточных станков [1]. Поэтому в настоящей работе была поставлена цель - учесть при расчетах металлорежущих станков и технологических операций особенности, возникающие при прерывистой резании.

Задача динамического расчета станка при обработке прерывистой поверхности имеет ряд существенных отличий, которые должны найти свое отражение в расчетной схеме. Определяющим признаком замкнутой динамической системы станок - резание при такой обработке является нестационарность исследуемой системы: чередуются во времени замкнутые и незамкнутые состояния вследствие периодических прерываний процесса резания. Таким образом, динамическая система станка испытывает влияние параметрических возмущений. Прерывистость обрабатываемой поверхности приводит также к внешним воздействиям на рабочие процессы (изме-

нениям настройки), периодически повторяющимся в моменты врезания и выхода. Названные особенности исследуемой динамической системы приводят к тому, что потеря устойчивости в ней может возникать не только из-за наличия обратных связей, но и из-за периодического изменения параметров.

Следует отметить также, что расчетная схема должна учитывать основные формы колебаний отделочно-расточного станка, а динамическая характеристика резания - отражать отличительные особенности процесса тонкого растачивания прерывистых поверхностей.

Известно [2], что типичной формой колебаний, возникающих при обработке на отделочно-расточных станках, является изгибная форма колебаний подсистемы шпиндель - борштанга. Этой форме соответствует частота, весьма близкая к основной частоте изгибных колебаний борштанги. Обычно значения частот находятся в интервале от 100 до 1500 Гц, причем меньшие значения соответствуют длинным борштангам большего диаметра. Декремент колебаний подсистемы шпиндель - борштанга лежит в пределах от 0,05 до 0,2, возрастая с уменьшением длины и увеличением диаметра борштанги.

Если принять, что жесткость подсистемы деталь - приспособление высока, то удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными о границах устойчивости и вынужденных колебаниях достигается введением эквивалентной упругой системы с одной степенью свободы, причем ее жесткость - C , собственная частота — p , и демпфирование h должны совпадать с характеристиками реальной упругой системы.

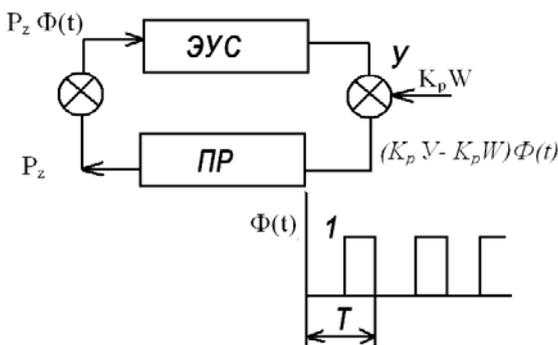


Рис.1. Замкнутая динамическая система при прерывистом резании.

Расчетная схема замкнутой динамической системы станка составлена на базе основных положений теории динамики станков [3] (рис.1). Эквивалентная упругая система (ЭУС) и процесс резания (ПР) являются стационарными элементами замкнутой динамической системы станка, испытывающими воздействие внешних возмущений $f(t)$ и $y_1(t)$. Нестационарность описывается умножением выходов стационарных звеньев на кусочно-постоянную периодическую функцию $\Phi(t)$.

период изменений которой не больше периода вращения шпинделя. Приняв, что соответствующие силы резания связаны соотношением

$$P_y = \mu P_Z,$$

где μ - коэффициент трения стружки о переднюю грань, запишем уравнения движения по направлениям главных осей жесткости

$$\begin{aligned} p_1^{-2} \ddot{z} + p_1^{-2} 2h_1 \dot{z} + z &= k_1 P_z \Phi(t) + f_1(t)k_1; \\ p_2^{-2} \ddot{y} + p_2^{-2} 2h_2 \dot{y} + y &= \mu k_2 P_z \Phi(t) + f_2(t)k_2; \\ T_p \dot{P}_Z + P_Z &= (-k_p y + k_p W) \Phi(t), \end{aligned} \tag{1}$$

где $\Phi(t)$ - функция времени периода $2\pi/\omega = (l_n + l_g)/v$, определяемая для случая равнорасположенных пазов соотношениями

$$\Phi(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } i \frac{l_n + l_e}{v} \leq t \leq i \frac{l_n + l_e}{v} + \frac{l_n}{v} \\ 1 & \text{при } i \frac{l_n + l_e}{v} + \frac{l_n}{v} \leq t \leq (i+1) \frac{l_n + l_e}{v} \end{cases}, \quad i = 0, 1, 2, \dots,$$

здесь $p_{1,2}$ - собственные круговые частоты, $h_{1,2}$ - коэффициенты демпфирования, $k_{1,2}$ - коэффициенты податливости, $f_{1,2}$ - внешние силовые возмущения, w - толщина среза, v - скорость резания, k_p - коэффициент резания, T_p - постоянная времени стружкообразования, l_n - ширина паза, l_e - ширина выступа.

Система уравнений (1), описывающая колебания в замкнутой динамической системе станка, представляет собой систему обыкновенных линейных дифференциальных уравнений 5-го порядка с переменными коэффициентами. Следует отметить, что точное аналитическое решение такой системы неизвестно. Поэтому были изучены условия-устойчивости решений при таких допущениях: 1) колебания, развивающиеся по нормали к обрабатываемой поверхности, являются определяющими; 2) при тонком растачивании, проводимом на больших скоростях, толщина срезаемого слоя мала, и постоянная времени стружкообразования оказывается малой. Первое допущение позволяет рассматривать колебания по y , второе - принять стационарную характеристику процесса резания. Применяя подстановку Эйлера

$$y(t) = U(t)e^{-\frac{b}{2m}t},$$

и проведя некоторые преобразования, от уравнений (1) переходим к уравнению

$$\ddot{U} + p_0^2 [1 - 2v\Phi_1(t)]U = 0,$$

$$\Phi_1(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } iT < t < iT + \Delta T, \\ -1 & \text{при } iT + \Delta T < t < (i+1)T, \end{cases} \quad (2)$$

где $p_0^2 = \frac{c_2}{m} + \frac{k_{p1}}{2m} - \frac{b^2}{4m^2}$, $k_{p1} = \mu k_p$; $2v = \frac{k_{p1}}{2mp_0^2}$; $b = 2h_2m$; $m = \frac{c_2}{p_2^2}$.

Выражение (2) представляет собой уравнение Хилла в стандартной форме.

Для частного случая уравнения Хилла, когда $\Phi_1(t)$ представляет собой кусочно-постоянную функцию специального вида

$$\Phi_1(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } iT < t < i\left(T + \frac{\Delta t}{2}\right), \\ -1 & \text{при } i\left(T + \frac{\Delta t}{2}\right) < t < (i+1)T, \end{cases}$$

условия устойчивости решения исследованы точным методом - методом сшивания.

Пользуясь условиями периодичности решений и сшивания, нами получено условие устойчивости в общем случае, когда жесткость системы изменяется по кусочно-постоянному закону с произвольным промежутком времени Δt .

Введя безразмерные параметры $-p/w$ - отношение частоты колебаний системы с постоянной жесткостью к частоте возмущения (частоте колебаний жесткости);

$q = \frac{\Delta t}{T}$ - характеристика формы параметрического возбуждения; $2v = \frac{k_{p1}}{2mp^2}$ - коэф-

коэффициент возбуждения, m - приведенная масса, и, опуская промежуточные преобразования, запишем условие устойчивости в виде

$$|N| = \cos \left\{ \frac{2\pi}{w} p \left[\sqrt{1+2\nu} + q(\sqrt{1+2\nu} - \sqrt{1-2\nu}) \right] \right\} - \frac{1 - \sqrt{1-(2\nu)^2}}{\sqrt{1-(2\nu)^2}} \sin \left[\frac{2\pi}{w} qp\sqrt{1-2\nu} \right] \sin \left[\frac{2\pi}{w} p(1-q)\sqrt{1+2\nu} \right] < ch \left(\delta \frac{p}{w} \right),$$

где δ - логарифмический декремент колебаний.

Для построения областей параметрической устойчивости была составлена программа расчетов. Рассмотрим пределы варьирования параметров.

Частота параметрического возбуждения может изменяться в широких пределах. Если за один оборот резание прерывается несколько раз, то отношение частот p/w может попасть в наиболее опасную резонансную зону, соответствующую малым значениям этого отношения. Так, для борштанги с собственной частотой 200 Гц при восьми прерываниях резания за оборот $p/w = 1$, если частота вращения становится равной 25 Гц, что соответствует 1500 об/мин. Важно исследовать и условие параметрического возбуждения при больших значениях p/w , так как при $1 - 2^x$ прерываниях резания за оборот, частоте вращения 20 - 25 Гц и собственных частотах борштанги 500 - 600 Гц значение p/w может попасть в интервал 5 - 20.

Значения коэффициента q зависят от соотношения между интервалом прерывания резания Δt и периодом параметрического возмущения $T = \frac{2\pi}{w}$. Величина этого

коэффициента может изменяться от нуля до единицы в зависимости от формы обрабатываемой детали (ширины пазов, диаметра отверстий, их относительного расположения).

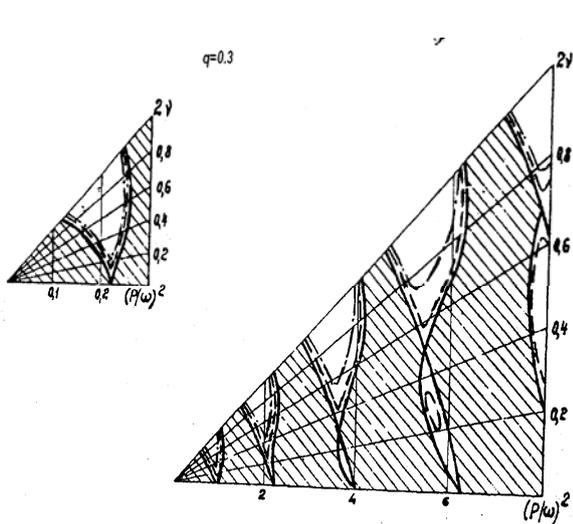


Рис.2. Влияние демпфирования на устойчивость:

- $\delta=0,05$;
- .-.-.- $\delta=0,2$;
- $\delta=0$.

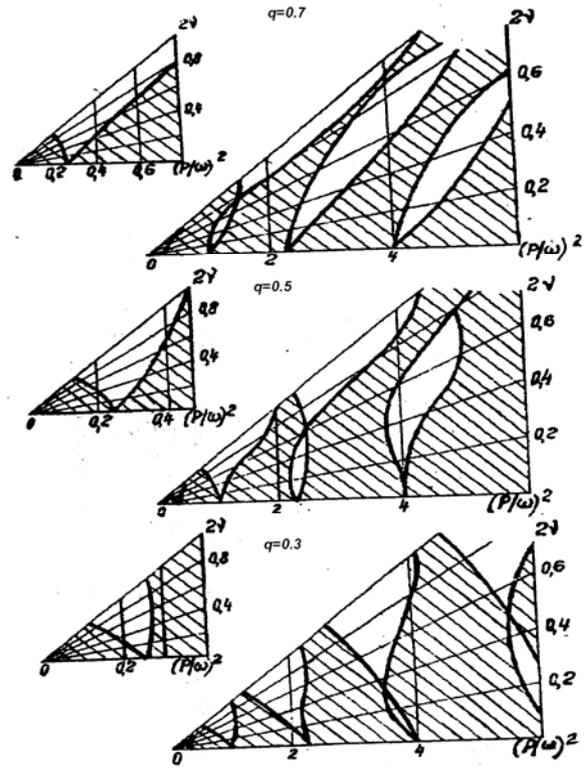


Рис. 3. Влияние формы параметрического возбуждения на устойчивость.

Значение коэффициента возбуждения 2ν зависит от коэффициента резания K_p и жесткости упругой системы. Для тонкого растачивания характерны малые значения $2\nu = (0 - 0,4)$.

Логарифмический декремент колебаний δ для отделочно-расточных станков изменяется в пределах $0,05 \div 0,25$. В расчетах приняты минимальные и средние значения δ , а также $\delta = 0$.

Некоторые результаты расчетов приведены в виде графиков областей неустойчивости, построенных в плоскости, где за абсциссы приняты значения $(p/w)^2$, а угол наклона луча равен 2ν (рис.2-3). Заштрихованы на рисунках области устойчивости. Первая область неустойчивости (область главного параметрического резонанса) показана в увеличенном масштабе.

Для характеристики влияния демпфирования на положение границ областей неустойчивости удобно пользоваться понятием критического коэффициента возбуждения (минимальное значение коэффициента возбуждения, при котором возможно возникновение параметрического резонанса) - $2\nu^*$ (табл 1).

Установлено, что форма параметрического возмущения существенно влияет на положение области устойчивости. Это влияние тем больше, чем больше коэффициент 2ν , и в общем случае одинаково для всех областей. Если принять $q = 0,5$ за основное, то уменьшение q приводит к повороту областей неустойчивости влево, т.е. с ростом ν параметрический резонанс возникает при больших значениях частоты возмущения w , чем в основном случае. Когда q становится больше $0,5$, области неустойчивости поворачиваются вправо. Изменение формы параметрического возмущения изменяет также и конфигурацию областей: точки самопересечения границ областей неустойчивости могут исчезать. Изменение q приводит, например, к тому, что при больших коэффициентах возбуждения в данной области неустойчивости возникает параметрический резонанс при таких значениях p/w , которые при малых ν соответствуют соседним областям. Рост q при больших значениях ν вызывает расширение диапазона опасных значений p/w .

Установлено, что с ростом логарифмического декремента колебаний δ области устойчивости расширяются. Рост демпфирования неодинаково сказывается на разных областях неустойчивости: меньше всего рост демпфирования влияет на границы первой области неустойчивости. Важной особенностью рассматриваемой системы с кусочно-постоянным возмущением является немонотонное изменение ν^* с ростом номера области неустойчивости.

Литература: 1. Линчевский П.А., Джугурян Т.Г., Оргиян А.А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках. – К.: Техніка, 2001. – 300с. 2. Копелев Ю.Ф., Оргиян А.А., Прик Ю.В. Колебания консольных борштанг при истечении воздуха в зону резания // Металлорежущие станки: Респ.межвед. науч.-техн. сб. – К.: Техніка, 1982. – Вып.10. – С. 6-9. 3. Кудинов В.В. Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 360с.

Таблица 1

$(p/w)^2$	$2\nu^*$			
	$\delta = 0,05$		$\delta = 0,2$	
	$q=0,5$	$q=0,3$	$q=0,5$	$q=0,3$
0,15	0,01	0,03	0,1	0,15
1	0,19	0,06	0,36	0,2
2,25	0,07	0,08	0,71	0,35
4	0,18	0,34	0,4	0,52
6,25	0,19	0,2	0,58	0,64
9	0,2	0,19	-	0,74

СОСТАВ НАПЫЛЕННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ СЛОЕВ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Лебедев В. Г., докт. техн. наук, проф., Чумаченко Т. В. (г. Одесса, Украина)

The studies directed on modification of the chemical composition of dusted ceramics layers for increasing of thermoconductivity and the limit of toughness of dusted layer were made to make the said layers to be less sensitive to residual stresses produced by the temperature of grinding.

В настоящее время для повышения жаростойкости, жаропрочности и износостойкости поверхностей различных деталей, шеек тяжело нагруженных валов, турбинных лопаток, применяется напыление керамическими материалами [1].

Нами предложен порошок для газотермического напыления с показателями по износостойкости, жаростойкости напыленного слоя, превышающими допустимые значения. Слой обладает более высокой трещиностойкостью при шлифовании, что позволяет уменьшить шлифовочный брак и повысить продуктивность обработки.

Этот порошок состоит из смеси Al_2O_3 или Cr_2O_3 , или TiO_2 , или их смеси в различных соотношениях дополнительно содержат порошок с дисперсностью 50-100 мкм углерода (С) или TiC или WC или их смеси в различном соотношении таким образом, что состав порошка для напыления содержит (мас. %):

Al_2O_3 или Cr_2O_3 , или TiO_2 , или их смесь в различных соотношениях	70 - 90
порошок углерода (С) или порошок TiC , или порошок WC или их смесь в различных соотношениях	10 - 30

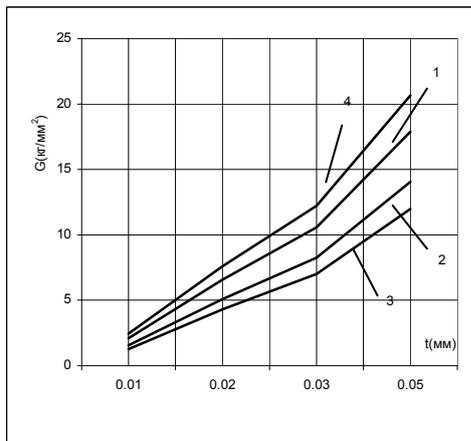


Рисунок. График изменения остаточных напряжений на поверхности детали в зависимости от глубины шлифования в керамическом напыляемом слое. 1-10 % WC + 90 % Al_2O_3 , $G_{дон} = 16,55$ кг/мм²; 2-20 % WC + 80 % Al_2O_3 , $G_{дон} = 18,6$ кг/мм²; 3-30 % WC + 70 % Al_2O_3 , $G_{дон} = 20,65$ кг/мм²; 4 - 100 % Al_2O_3 , $G_{дон} = 14,5$ кг/мм²; $S=100$ мм/мин; $V=10$ м/мин; $V_k=35$ м/сек.

Мы провели эксперименты по измерению сил резания и рассчитали остаточные напряжения при шлифовании керамики эльборовым кругом 125/100-К по формуле:

$$\sigma = \frac{\lambda E \left[\eta_{1,12} q \sqrt{\frac{\sqrt{Dt}}{V}} \left[e^{-\frac{z^2}{4a \frac{\sqrt{Dt}}{V}}} + z \Phi \left(\frac{z}{2 \sqrt{a \frac{\sqrt{Dt}}{V}}} \right) \right] - 20 \right]}{2 - 2\mu}, [2]$$

где λ – коэффициент теплопроводности; E – модуль упругости; η – количество теплоты, переходящее в деталь; q – плотность теплового потока; $q = P_z V_k$, где V_k – скорость круга, P_z – тангенциальная составляющая силы резания – сила стружкообразования; D – диаметр шлифовального круга; V – скорость детали; t – глубина шлифования; a – коэффициент температуропроводности; z – расстояние определен-

ной точки от поверхности вглубь детали.

Состав напыленного порошка используется, например, для детонационного напыления на рабочую поверхность металлических деталей, для образования слоя, толщиной в 1мм. После этого деталь шлифуется до заданной точности и шероховатости. Так как поверхностные температуры шлифования снижаются и распределяются равномерно, в напыляемом слое снижаются и тепловые внутренние напряжения, не превышающие прочность напыленного слоя, в результате чего трещины не образуются.

Наибольший эффект дает добавление к напыляемому порошку WC. При этом значительно снижается коэффициент теплопроводности и температуропроводности, увеличивается предел прочности. В результате безопасный уровень напряжений может быть достигнут при глубине шлифования до 0,05мм, если позволяют ограничения по шероховатости поверхности.

Литература: 1. Уайэтт О., Дью – Хьюз Д. Металлы керамики полимеры: Пер. с англ. –М.: Атомиздат, 1979. – 204с. 2. Редько В.Г. Процессы теплообразования при шлифовании. – Саратов, изд. саратского ун-та, 1962.–178с.

УДК 621.923

ВОПРОСЫ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ НАПЫЛЕННОГО СЛОЯ АРМИРОВАННОГО КАРБИДАМИ

Клименко Н.Н., канд. техн. наук, **Лебедев В.Г.**, докт. техн. наук
(г. Одесса, Украина)

Improvement of a quality of a superficial layer of the details with a covering from plated by nickel-phosphorus and copper carbide of the titan or tungsten being grinded is considered. Conditions of cutting of carbide particles by a diamond cutting grain and assignment of comprehensible modes of grinding are determined.

Детали современного машиностроения работают, как правило, при высоких скоростях, нагрузках и повышенных температурах. Поэтому поверхностный слой таких деталей должен обладать высокой износостойкостью, коррозионной стойкостью и жаростойкостью. Эти качества могут быть достигнуты путем напыления рабочих поверхностей деталей сплавами системы никель-медь-фосфор, армированных карбидами вольфрама или, карбидами титана, что более приемлемо с экономической точки зрения. Таким образом, на поверхности детали формируется никель-медно-фосфорная матрица, заполненная до 50% карбидами титана или вольфрама. При эксплуатации карбиды являются именно теми твердыми включениями, которые воспринимают нагрузку контр-тела, а частично выработанная матрица обеспечивает образование масляных депо, которые обеспечивают смазку трущихся деталей.

Как правило, напыленные поверхности деталей подвергаются шлифованию, которое придает им окончательные размеры, форму и шероховатость. Однако именно шлифование часто ухудшает качество поверхностного слоя, оставляя после себя многочисленные раздробленные карбиды с острыми вершинками, которые работают при эксплуатации как микрорезцы, изнашивая контр-тело в сопряжении. Получение шлифованного напыленного слоя с плоскими и гладкими вершинами возможно только при шлифовании эльборовыми или алмазными кругами, зерна которых более твердые, чем карбидные частицы. Алмазное зерно перережет карбидную частицу в том случае, если напряжение на контактной площадке между зерном и карбидом

окажется большим, чем предел прочности последнего.

Условие перерезания карбидной частицы найдено из соотношения равенства работ. С одной стороны кинетическая энергия зерна, реализующаяся в работе перерезания карбида должна быть равна работе тангенциальной силы резания на пути перерезания зерна, т.е. в самом неблагоприятном случае на длине его наибольшего условного диаметра. Исходя из данного условия, напряжение перерезания карбида будет:

$$G_{np} = \frac{m_3 \cdot v_3^2}{2 \cdot \pi \cdot d_K \cdot r_3 \cdot h_3} = \frac{0,524 \cdot d_3^3 \cdot \gamma_3 \cdot v_3^2}{2 \cdot \pi \cdot d_K \cdot r_3 \cdot h_3}, \quad (1)$$

где G_{np} – напряжение перерезания карбида, Н/м²; m_3 – масса абразивного зерна, Н·с²/м; v_3^2 – скорость абразивного зерна, м/с; d_K – условный диаметр карбидной частицы, м; r_3 – радиус закругления режущей вершинки зерна, м; h_3 – сечение стружки, снимаемой зерном, м; d_3 – условный диаметр абразивного зерна, м; γ_3 – плотность абразивного зерна, кг/м³.

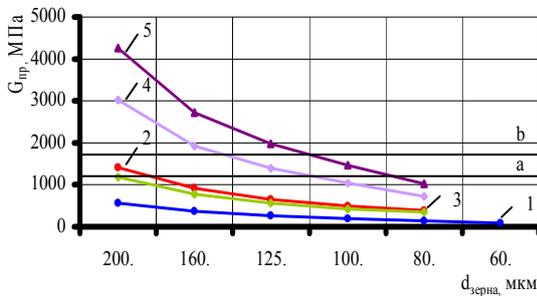


Рис.1. Напряжения на контактной площадке зерно-карбид: 1 – $v_{кр} = 35$ м/с, $v_d = 5$ м/мин, $t=0,01$ мм; 2 – $v_{кр} = 35$ м/с, $v_d = 2$ м/мин, $t=0,01$ мм; 3 – $v_{кр} = 45$ м/с, $v_d = 5$ м/мин, $t=0,01$ мм; 4 – $v_{кр} = 45$ м/с, $v_d = 2$ м/мин, $t=0,01$ мм; 5 – $v_{кр} = 45$ м/с, $v_d = 2$ м/мин, $t=0,005$ мм.

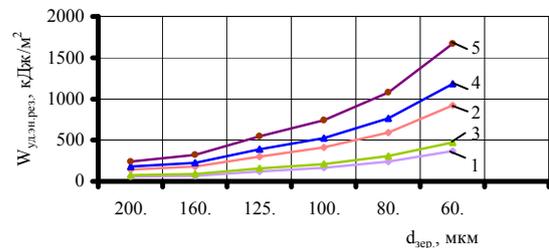


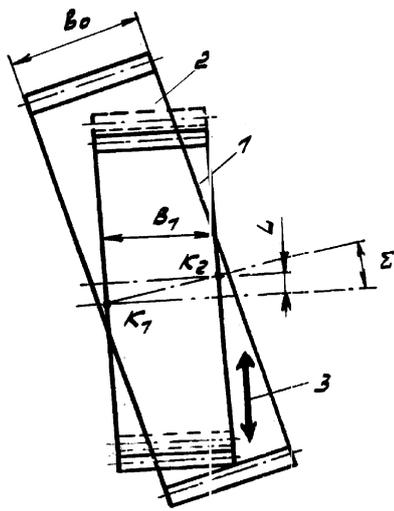
Рис.2. Значения удельной энергии резания в зависимости от величины алмазного зерна и режимов шлифования: 1 – $v_{кр} = 35$ м/с, $v_d = 5$ м/мин, $t=0,01$ мм; 2 – $v_{кр} = 35$ м/с, $v_d = 2$ м/мин, $t=0,01$ мм; 3 – $v_{кр} = 45$ м/с, $v_d = 5$ м/мин, $t=0,01$ мм; 4 – $v_{кр} = 45$ м/с, $v_d = 2$ м/мин, $t=0,01$ мм; 5 – $v_{кр} = 45$ м/с, $v_d = 2$ м/мин, $t=0,005$ мм.

Очевидно, что карбидная частица будет перерезана только в том случае если $G_{np} > G_{don}$, где G_{don} – допустимое напряжение предела прочности карбидной частицы, МПа.

Определяя по данным литературы [2] пределы прочности для карбида титана 1100 МПа и 1600 МПа для карбида вольфрама, а так же определяя значения r_3 и h_3 для различных зернистостей алмазного круга и различных режимов резания [1], можно получить напряжения развиваемые зернами различной зернистости алмазных кругов при контакте с карбидными частицами (рис. 1).

Как видно из рисунка, напряжения на контактной площадке между алмазным зерном и карбидной частицей могут быть весьма велики. При достаточно мелких зернах и при высоких скоростях вращения круга карбидные частицы будут перерезаться. Для оценки режимов резания и наиболее приемлемых зернистостей необходимо сравнить значения условного напряжения резания с пределами прочности частиц, как карбида титана, так и карбида вольфрама соответственно 1100 и 1600 МПа [2].

Как видно из приведенных данных при увеличении диаметра зерна, глубины резания и скорости относительного перемещения детали, напряжение резания уменьшается и есть возможность после шлифования иметь в поверхностном слое



Мал.1. Схема тангенціального шевінгвання.

раздавленные или разбитые карбидные частицы с острыми вершинками, которые будут при эксплуатации царапать контр-тело. Приемлемые режимы шлифования при различных диаметрах алмазных зерен (от которых легко перейти к конкретным зернистостям), при шлифовании напыленных слоев, имеющих карбиды титана, можно выбрать, ориентируясь на значения напряжения резания на рис. 1, над линией *a* для TiC и над линией *b* для WC, то есть режимы резания могут быть такими, при которых напряжение резания больше 1100 МПа или 1600 МПа.

Удельная энергия резания, с учетом зависимости (1) будет:

$$W_y = \frac{m \cdot v_3^2}{2 \cdot F} = \frac{0,524 \cdot d_3^3 \cdot \gamma_3 \cdot v_3^2}{2 \cdot \pi \cdot r_3 \cdot h_3} \quad (2)$$

Значения, показывающие изменение удельной энергии резания в зависимости от величины алмазного зерна и режимов шлифования показаны на рис. 2. Сопоставляя данные рис. 2 с данными рис. 1, можно показать, что удельная энергия резания, необходимая для перерезания карбидной частицы колеблется в значительных пределах и составляет величину в интервале порядка 183 – 1078 кДж/м².

Выводы: 1. Перерезание карбидной частицы алмазным режущим зерном возможно, если условное напряжение резания на контактной площадке “зерно”-“карбид” больше предела прочности карбида. 2. Режимы резания должны способствовать уменьшению контактной площадки режущего зерна с карбидом: скорость резания иметь максимальное значение, глубина резания и поперечная подача – минимальные. 3. Удельная энергия резания изменяется в широких пределах и не может служить надежным показателем условия перерезания карбидной частицы, так как важно знать размеры контактной площадки, на которой данная энергия реализуется.

Литература: 1. Лебедев В.Г., Жабокрицкий Р.А. Определение удельного числа режущих зерен и расстояния между ними на рабочей поверхности шлифовального круга // Теплофизика технологических процессов // - Саратов, изд. Саратовского университета, 1976. – С. 111-115. 2. Самсонов Г.В., Эпик А.П. Покрытия из тугоплавких соединений. - М.: Металлургия, 1979. – 400 с.

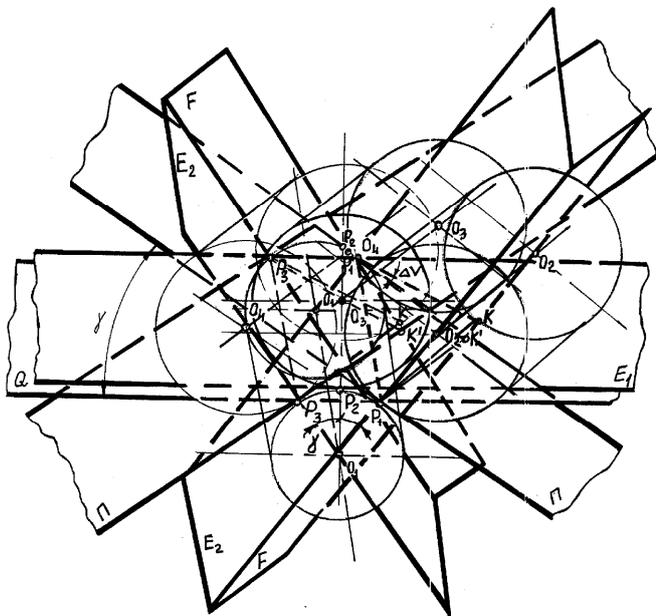
УДК 515.2:518

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ВЕРСТАТНОГО ЗАЧЕПЛЕННЯ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ПРИ ОБРОБЦІ МЕТОДАМИ ВІЛЬНОГО ОБКАТУ

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

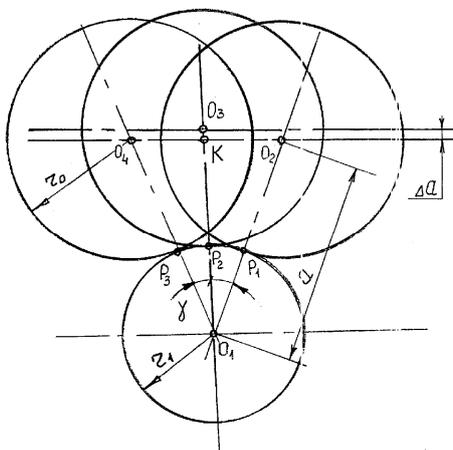
The way of reception of longitudinal updating tools is described l sheving without use special adaptations and has attached. The settlement dependences for definition of a corner of axes submission are given which provide achive-ment of longitudinal updapting tools.

Суттєвий вплив на надійність створюваних і експлуатованих машин впливають оптимізація навантаження і швидкості ковзання спряжених деталей. Тому при проектуванні необхідно комплектувати вироби деталями, які виявилися надійними в експлуатації, враховувати оптимальну техно-логічність конструкції. Особливу увагу треба приділяти на локалізацію динамічних навантажень і вібрацій, виникаючих при роботі агрегатів і машин, так як вони суттєво впливають на інтенсивність зношення,



Мал.3.Зміна положення центра схрещування при тангенціальному шевінгуванні.

перпендикулярно осі оброблюваного колеса 1. Для здійснення тангенціального шевінгування шевер 2 повинен бути ширше, ніж зубцюватий вінець колеса. При невеликих припусках тангенціальне шевінгування виконується за один подвійний хід, а при значних – можлива робота за кілька ходів стола з радіальною подачею. При такому методі обробки центр схрещування переміщається щодо поверхні зубів шевера, тому знос ріжучих кромek протікає рівномірно, стійкість інструмента підвищується. При зближенні шевера й оброблюваного колеса за рахунок радіальної подачі утвориться пляма контакту. У процесі обробки шевінгуванням, форми і розміри зуба оброблюваного колеса безупинно змінюються, що приводить до постійної зміни умов контакту робочих по-верхонь шевера і заготовлі. Значні зусилля при обробці викликають пружні деформації елементів технологічної системи, величина деформації елементів технологічної системи зменшується зі збільшенням числа проходів [2]. Це приводить до зміни положення центра схрещування в процесі обробки і як наслідок виникненню похибки напрямку зуба [3]. У період врізання шевера в оброблювану заготовку (мал. 2) величина припуску, що видаляється, максимальна, що



Мал. 2. Змінення міжвісьової відстані.

приводить до збільшення плями контакту в процесі обробки. Це приводить до зростання зусиль різання, які викликають пружні деформації елементів технологічної системи, зміну положення центра схрещування осей заготовлі і шевера. Надалі за рахунок збільшення плями контакту, зусилля різання досягають своїх максимальних значень, і подальшого впровадження ріжучих зубців шевера в оброблювану заготовку не відбувається ($m.P_2$). У цей період шевер своїм ділильним циліндром буде перекочуватися по ділильному циліндру оброблюваної заготовкі. На початку робочого ходу ($m.P_1$) кут схрещування осей шевера і заготовкі Σ утворений проекцією цих осей на пло-

міцність і непередбачені поломки деталей.

Особливе значення ці вимоги здобувають для трудомістких і складних у виготовленні деталей машин, до яких відносяться зубчасті колеса. З операцій фінішної обробки зубцюватих вінців широке поширення одержали методи вільного обкату при схрещуючихся осях шевінгуванням і хонінгуванням. В даний час у машинобудуванні знайшли поширення п'ять методів шевінгування зубчастих коліс: подовжнє, діагональне, тангенціальне, «короткого ходу» і врізне [1].

Метод тангенціального шевінгування (мал.1) характеризується наявністю дотичної подачі Z , спрямованої

щину Π не дорівнює розрахунковому куту схрещування Σ (має місце перекіс осей шевера і заготівлі), а утворююча ділильного циліндра шевера складає з площиною Π кут ΔV (непаралельність осей), тобто має місце комбінований перекіс осей заготовки й інструмента (мал. 3). Площини Π проведені через крапки контакту P_1 і P_3 ділильних циліндрів шевера і заготовки на початку і кінці циклу обробки, і є дотичними до ділильного циліндра заготівлі. Площини F проведені через осі шевера на початку і кінці обкату і через крапки P_1 і P_3 . Площини E_2 проведені через вісь заготовки і крапки контакту P_1 і P_3 . Площина E_1 проведена дотично до ділильних циліндрів шевера і заготовки при обробці в середнім положенні. Площина Q проведена через крапку ко-нтакту P_1 і P_3 паралельно площини E_1 . O_1O_1 – вісь заготовки; O_2O_2 – вісь шевера на початку циклу обробки; O_3O_3 – вісь шевера в середині циклу обробки; O_4O_4 – вісь шевера наприкінці циклу обробки. З побудов, приведених на мал. 3 випливає, що найбільше відхилення осі шевера від розрахункового значення досягається на початку і кінці циклу обробки (P_1 і P_3). У середині циклу обробки (т. P_2) вісь шевера O_3O_3 практично не буде мати відхилень і залишається рівнобіжною площини Π . У цей період площини Π і E_1 збігаються. Для визначення максимального кута непаралельності осей шевера і заготівлі необхідно спроектувати осі заготівлі й інструмента в момент початку обкату на площину E_1 (P_1K' і $P_1P_1^1$). У результаті проектування $P_1P_1^1$ на площину F одержуємо відрізок P_1K . Кут $K P_1K'$ є максимальною величиною непаралельності осей шевера і заготівлі. З побудов приведених на мал. 3. випливає, що $KK' = P_1P_1^1 \operatorname{tg} \gamma$;

$$\operatorname{tg} \Delta V = KK' / P_1K'; \quad \operatorname{tg} \Delta V = \operatorname{tg} \gamma \sin \Sigma' . \quad (1)$$

У формулі (1) Σ' - дійсне значення кута схрещування осей заготівлі й інструмента на початку циклу обробки, град. Крім того

$$\operatorname{tg} \Sigma' = \operatorname{tg} \Sigma \cos \gamma; \quad \sin \Sigma' = (\operatorname{tg} \Sigma \cos \gamma) / \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \Sigma \cos^2 \gamma} . \quad (2)$$

З побудов на мал. 2 відстані $O_1O_2 = r_{11} + r_0$; $O_1K = r_{11} + r_0 - \Delta \alpha$, де $r_{11} = r_1 / \cos^2 \Sigma$ є приведеним радіусом кривизни оброблюваної заготовки, мм; r_1 – радіус ділильної окружності заготівлі, мм; r_0 – радіус ділильної окружності шевера, мм; $\Delta \alpha$ – зміна положення центра схрещування осей заготівлі й інструмента, мм.

$$\cos \gamma = \frac{r_0 \cos^2 \Sigma + r_1 - \Delta \alpha \cos^2 \Sigma}{r_0 \cos^2 \Sigma + r_1}; \quad \operatorname{tg} \gamma = \frac{\cos \Sigma \sqrt{\Delta \alpha (2(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1) - \Delta \alpha \cos^2 \Sigma)}}{r_0 \cos^2 \Sigma + r_1 - \Delta \alpha \cos^2 \Sigma} . \quad (3)$$

Підставляючи вираження (2) і (3) у формулу (1) одержимо вираження для визначення кута непаралельності осей, перекоосу осей шевера і заготовки:

$$\operatorname{tg} \Delta V = \sin \Sigma \sqrt{\frac{\Delta \alpha (2c - \cos^2 \Sigma)}{c(1 + \operatorname{tg}^2 \Sigma)(c - \Delta \alpha \cos^2 \Sigma)}}; \quad (4)$$

$$\sin \Sigma' = \operatorname{tg} \Sigma \sqrt{\frac{c - \Delta \alpha \cos^2 \Sigma}{c(1 + \operatorname{tg}^2 \Sigma)}}, \quad (5)$$

де $C = r_0 \cos^2 \Sigma + r_1$. (6)

Для випадку обробки тангенціальним методом шевінгування довжина лінії контакту буде складати не менш половини ширини зуба заготовки [4].

$$F_\beta = b_1 \operatorname{tg} \alpha_n \operatorname{tg} \Delta V, \quad (7)$$

де F_{β} - похибка напрямку зуба, мм; α_n - нормальний кут зачеплення, град; b_1 - ширина зубцюватого вінця заготівлі, мм; ΔV - величина кута непаралельності осей, град. Підставляючи знайдені раніше значення кута ΔV із залежності (4), одержуємо:

$$F_{\beta} = b_1 \operatorname{tg} \alpha_n \sin \Sigma \sqrt{\frac{\Delta \alpha (2c - \cos^2 \Sigma)}{c(1 + \operatorname{tg}^2 \Sigma)(c - \Delta \alpha \cos^2 \Sigma)}}. \quad (8)$$

Отримані залежності дозволяють оцінити вплив параметрів верстатного зачеплення на похибку напрямку зуба при тангенціальному методі шевінгування, величину кута непаралельності осей, зміну кута схрещування осей шевера і заготівлі в процесі обробки. Проведені аналітичні й експериментальні дослідження дозволяють зробити висновок про те, що при тангенціальному шевінгуванні виникаючі на початку і кінці циклу обробки деформації технологічної системи призводять до зміни кута схрещування осей шевера і заготівлі, і як наслідок виникненню похибки напрямку зуба.

Література: 1. Калашников С.Н., Калашников А.С. Изготовление зубчатых колес. -М. Высшая школа. 1985г. – 223с. 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). Машиностроение. Ленинград. 1968 г. 308с. 4. Люкшин В.С. Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов. М.: Машиностроение, 1967. –372с.

УДК 515.2:518

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗМІНИ КУТА СХРЕЩУВАННЯ ОСЕЙ СПРЯЖЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ЗАГОТІВЛІ ТА ІНСТРУМЕНТУ НА ЯКІСТЬ ВІДРОБКИ

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

The way of reception of longitudinal updating tools is described l 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 updapping tools.

З операцій фінішної обробки зубцюватих вінців широке поширення одержали методи вільного обкату при схрещуючихся осях шевінгуванням і хонінгуванням. В даний час у машинобудуванні знайшли поширення п'ять методів шевінгування зубчастих коліс: подовжнє, діагональне, тангенціальне, «короткого ходу» і врізне [1]. Метод тангенціального шевінгування характеризується наявністю дотичної подачі, спрямованої перпендикулярно осі оброблюваного колеса, при цьому центр схрещування переміщується щодо поверхні зубів шевера, тому знос ріжучих кромок протікає рівномірно, стійкість інструменту підвищується. При зближенні шевера й оброблюваного колеса за рахунок радіальної подачі утвориться пляма контакту. У процесі обробки шевінгуванням, форма і розміри зуба оброблюваного колеса безупинно змінюються, що приводить до постійної зміни умов контакту робочих поверхонь шевера і заготівлі. Значні зусилля при обробці викликають пружні деформації елементів технологічної системи, величина деформації елементів технологічної системи зменшується зі збільшенням числа проходів [2]. Це призводить до зміни положення центра схрещування в процесі обробки і як наслідок виникненню похибки напрямку зуба. У період врізання шевера в оброблювану заготовку величина припуску, що видаляється, максимальна, що призводить до збільшення плями контакту в процесі обробки. Це приводить до зростання зусиль різання, які викликають пруж-

жні деформації елементів технологічної системи, зміну положення центра схрещування осей заготівлі і шевера. Надалі за рахунок збільшення плями контакту, зусилля різання досягають своїх максимальних значень, і подальшого впровадження ріжучих зубців шевера в оброблювану заготовку не відбувається. У цей період шевер своїм ділильним циліндром буде перекочуватися по ділильному циліндрі оброблюваної заготівлі. На початку робочого ходу (т.Р₁) кут схрещування осей шевера і заготовки Σ' утворений проекцією цих осей на площину П не дорівнює розрахунковому куту схрещування Σ (має місце перекус осей шевера і заготовки), а утворююча ділильного циліндра шевера складає з площиною П кут ΔV (непаралельність осей), тобто має місце комбінований перекус осей заготовки й інструмента [2,3]. Площини П проведені через крапки контакту Р₁ і Р₃ ділильних циліндрів шевера і заготовки на початку і кінці циклу обробки, і є дотичними до ділильного циліндра заготівлі. Площини F проведені через осі шевера на початку і кінці обкату і через крапки Р₁ і Р₃. Площини Е₂ проведені через вісь заготовки і крапки контакту Р₁ і Р₃. Площина Е₁ проведена дотично до ділильних циліндрів шевера і заготовки при обробці в середнім положенні. Площина Q проведена через крапку контакту Р₁ і Р₃ паралельно площини Е₁. О₁О₁ – вісь заготовки; О₂О₂ – вісь шевера на початку циклу обробки; О₃О₃ – вісь шевера в середині циклу обробки; О₄О₄ – вісь шевера наприкінці циклу обробки. Вирази для визначення кута непаралельності осей, перекоосу осей шевера і заготовки мають вигляд:

$$tg \Delta V = \sin \Sigma \sqrt{\frac{\Delta \alpha (2c - \cos^2 \Sigma)}{c(1 + tg^2 \Sigma)(c - \Delta \alpha \cos^2 \Sigma)}}; \quad (1)$$

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

$$де \quad C = r_0 \cos^2 \Sigma + r_1, \quad (3)$$

де r_1 – радіус ділильної окружності заготівлі, мм; r_0 – радіус ділильної окружності шевера, мм; $\Delta \alpha$ – зміна положення центра схрещування осей заготовки й інструмента, мм.

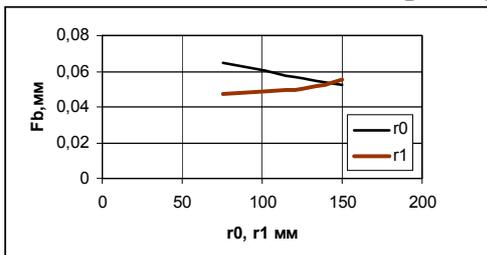
У процесі тангенціального шевінгування найбільше значення кут ΔV досягає при врізанні і виході шевера, і наближається до нульового значення при максимальних деформаціях технологічної системи. У цих крапках похибка напрямку зуба буде макси-мальною, т. ч. в результаті виникаючого перекоосу осей шевера і заготівлі відбудеться зміна площі плями контакту. Довжина плями контакту в цьому випадку зменшується, що призводить до врізання ріжучих зубців шевера на більшу глибину на початку і кінці циклу обробки. Довжина плями кон-такту відповідно до робіт [3, 4] залежить від параметрів верстатного зачеплення. У наслідок цього, для випадку обробки тангенціальним методом шевінгування довжина лінії контакту буде складати не менш половини ширини зуба заготівлі.

$$F_{\beta} = b_1 tg \alpha_n tg \Delta V, \quad (4)$$

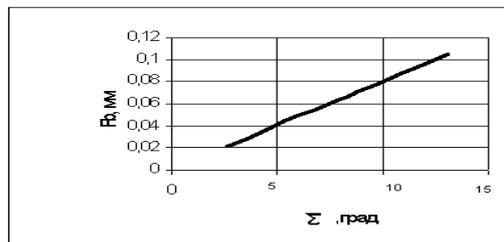
де F_{β} - похибка напрямку зуба, мм; α_n - нормальний кут зачеплення, град; b_1 - ширина зубцюватого вінця заготівлі, мм; ΔV - величина кута непаралельності осей, град. Підставляючи знайдені раніше значення кута ΔV із залежності (1), одержуємо:

$$F_{\beta} = b_1 tg \alpha_n \sin \Sigma \sqrt{\frac{\Delta \alpha (2c - \cos^2 \Sigma)}{c(1 + tg^2 \Sigma)(c - \Delta \alpha \cos^2 \Sigma)}}. \quad (5)$$

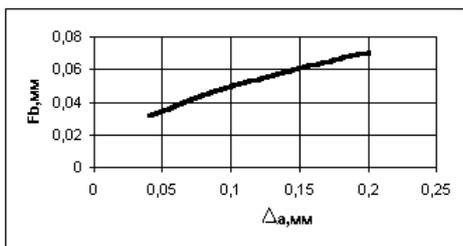
Отримані залежності (1), (2), (5) дозволяють оцінити вплив параметрів верстатного зачеплення на похибку напрямку зуба при тангенціальному методі шевінгування, зміну кута схрещування осей в процесі обробки. На мал.1, 2, 3 зображені графіки залежності похибки напрямку зуба від параметрів $r_0, r_1, \Delta a, \Sigma$.



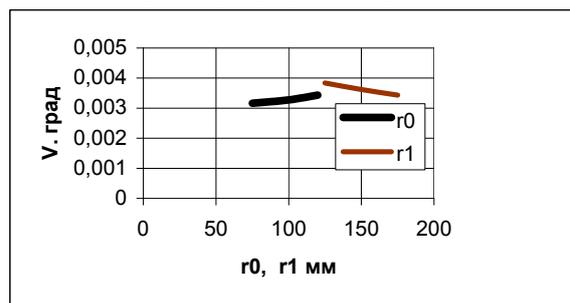
Мал.1. Залежність похибки напрямку зуба від параметрів r_0, r_1



Мал.2. Залежність похибки напрямку зуба від кута Σ .

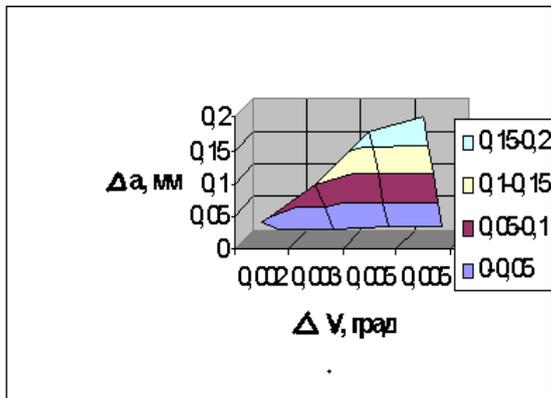


Мал.3. Залежність похибки напрямку зуба від параметрів Δa .

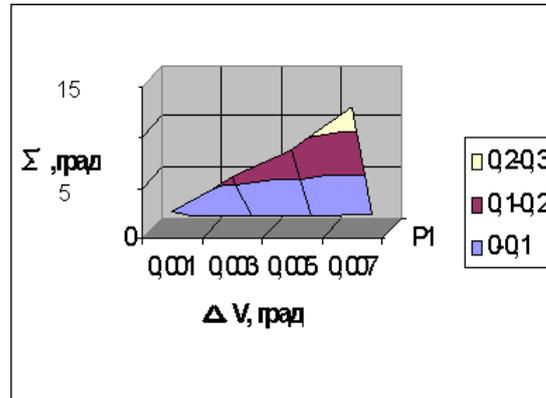


Мал.4. Залежність кута непаралельності осей від параметрів r_0, r_1 .

На мал. 4, 5, 6 зображені графіки залежності величини кута непаралельності осей від параметрів $r_0, r_1, \Delta a, \Sigma$.



Мал.5. Залежність величини кута непаралельності осей від Δa .



Мал.6. Залежність величини кута непаралельності осей від Σ .

Проведені аналітичні й експериментальні дослідження дозволяють зробити висновок про те, що при тангенціальному шевінгуванні виникаючі на початку і кінці циклу обробки деформації технологічної системи призводять до зміни кута схрещування осей шевера і заготівлі, і як наслідок виникненню похибки напрямку зуба. Зі зменшенням жорсткості технологічної системи величина похибки напрямку зуба збільшується. Підвищення кількості проходів призводить до зменшення похибки напрямку зуба. Зі зменшенням кута схрещування осей зменшується вплив деформації технологічної системи на похибку напрямку зуба. При відробці на паралельних осях виникаючі деформації технологічної системи не впливають на похибки напрямку зуба. Зміна величини видаляемого припуску, у процесі обробки, призводить до зсуву плями контакту уздовж зуба заготівлі. Найбільша похибка напрямку зуба буде

відповідати заготівлям, які мають найбільше радіальне биття. Зменшення похибки напрямку зубу досягається при збільшенні числа зубів інструмента.

Література: 1. Калашников С.Н., Калашников А.С. Изготовление зубчатых колес. -М. Высшая школа. 1985г. – 223с. 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. Уминский С.М. Исследование влияние 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. ХНП. 2003 г. с.59-61. 4. Сухоруков Ю.Н., Евстигнеев Р.И. Инструменты для обработки зубчатых колес методом свободного обката. – Киев: Техника, 1983. –120с.

УДК 515.2:518

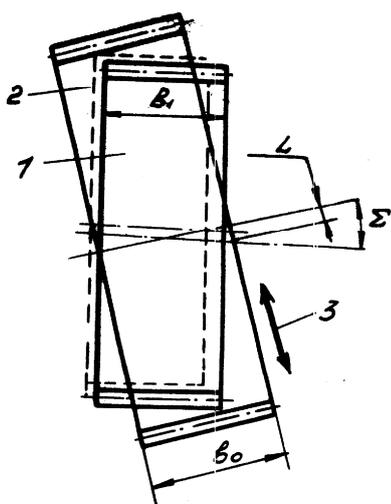
ВПЛИВ ЗМІНИ КУТА СХРЕЩУВАННЯ ОСЕЙ СПРЯЖЕНИХ ПОВЕРХОНЬ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ПРИ ШЕВІНГУВАННІ МЕТОДОМ «КОРОТКОГО ХОДУ»

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

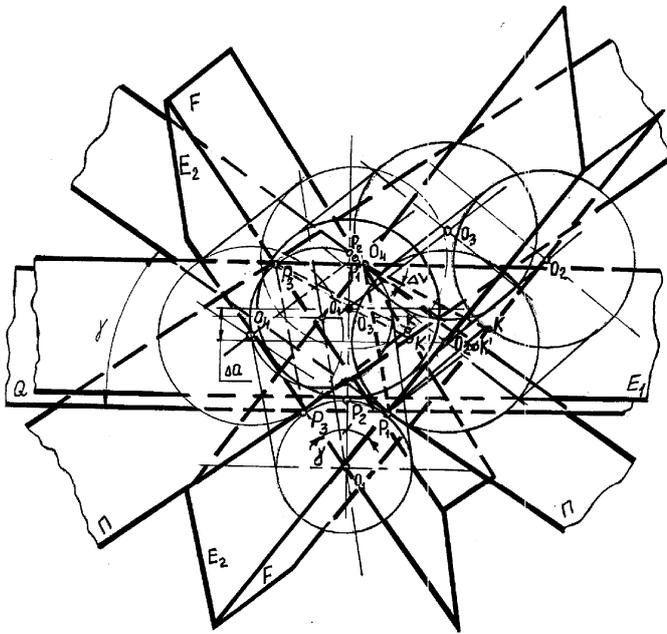
Results analytical and experimental researches of change of a corner of cross-ing of the connected surfaces of preparation and the tool are given during pro-cessing cogwheels sheving by a method of "a short course".

В даний час, вимоги підвищення продуктивності, забезпечення точності і якості обробки, необхідність зниження трудомісткості забезпечили широке поширення фінішної обробки зубцюватих вінців методами вільного обкату при схрещуючихся осях шевінгуванням і хонінгуванням. Шевінгування і хонінгування передбачає використання достатньо простого в налагодженні й обслуговуванні устаткування, а висока надійність елементів технологічної системи дозволяє використовувати процеси в автоматизованих виробництвах. Сутність шевінгування зводиться до механічного зіскаблювання з оброблюваної поверхні тонких стружок у результаті взаємного ковзання спряжених поверхонь зубів шевера і заготівлі. При цьому також має місце пластичне деформування металу в зоні обробки.

Великим достоїнством шевінгування є висока продуктивність, низькі швидкості обробки, що забезпечує відсутність прижогов, мікротріщин на оброблених поверхнях. Особливістю шевінгування методом «короткого ходу» є те, що подача 3 заготівлі спрямована перпендикулярно до осі шевера 2. (мал. 1) Однією з позитивних сторін цього методу є можливість використання шевера з меншою шириною зубцюватого вінця при обробці коліс з більшою шириною зубцюватого вінця в порівнянні з тангенціальним методом. При шевінгуванні, процес різання здійснюється за рахунок удавлення ріжучих зубців шевера у западину між зубами оброблюваної заготівлі, що призводить до виникнення пружних деформацій технологічної системи. У процесі здійснення тангенціального і «короткого ходу» методів шевінгування величина зусиль різання, що призводить до деформації технологічної системи при врізанні шевера збільшується, а при виході зменшується [1, 2].



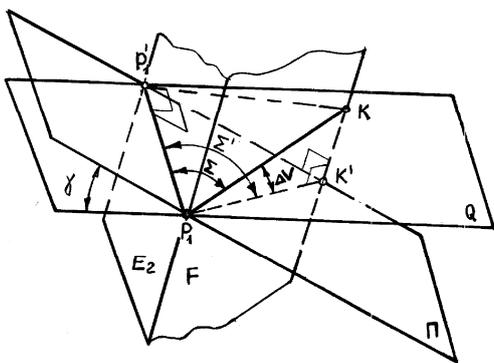
Мал.1. Схема шевінгування методом «короткого ходу».



Мал.2. Зміна міжвісьової відстані при шевінгуванні методом «короткого ходу».

осей на площину Π відрізняється від розрахункового кута схрещування. Утворююча ділильного циліндра шевера складає з площиною Π кут ΔV . Тому на початку робочого ходу буде мати місце комбінований перекіс осей шевера і заготівлі: перекіс осей шевера і заготівлі (кут $\Delta \Sigma$), відхилення від паралельності осей кут ΔV) [4].

Площини Π проведені через точки контакту P_1 і P_3 ділильних циліндрів шевера і заготівлі на початку і кінці циклу обробки, і є дотичними до ділильного циліндра заготівлі. Площини F проведені через осі шевера на початку і кінці обкату і через точки P_1 і P_3 . Площини E_2 проведені через вісь заготівлі і точки контакту P_1 і P_3 . Площина E_1 проведена дотично до ділильних циліндрів шевера і заготівлі при обробці в середнім положенні. Площина Q проведена через точку контакту P_1 і P_3 паралельно площини E_1 . O_1O_1 – вісь заготівлі; O_2O_2 – вісь шевера на початку циклу обробки; O_3O_3 – вісь шевера в середині циклу обробки; O_4O_4 – вісь шевера наприкінці циклу обробки. З побудов, приведених на мал.3 випливає, що найбільше відхилення осі шевера від розрахункового значення досягається на початку і кінці циклу обробки (P_1 і P_3). У середині циклу обробки (т. P_2) вісь шевера O_3O_3 практично не буде мати відхилень і залишається рівнобіжною площини Π . У цей період площини Π і E_1 збігаються [5]. Для визначення максимального кута непаралельності осей шевера і заготівлі необхідно спроектувати осі заготівлі й інструмента в момент початку обкату на площину E_1 (P_1K^1 і $P_1P_1^1$). У результаті проектування $P_1P_1^1$ на площину F одержуємо відрізок P_1K . Кут $K P_1K^1$ є максимальною величиною непаралельності осей шевера і заготівлі. З побудов, приведених на мал. 3 випливає, що $KK^1 = P_1P_1^1 \operatorname{tg} \gamma$;



Мал. 3 Схема до визначення кута непаралельності осей.

У період врізання шевера відбувається збільшення віддаляемого припуску і як наслідок збільшується пляма контакту інструмента і заготівлі. Збільшення плями контакту призводить до зростання зусиль різання, що у цей період досягають таких значень, при яких подальшого врізання ріжучих зубців шевера у бічну поверхню оброблюваної заготівлі вже не відбувається. У цей період шевер своїм ділильним циліндром перекочується по ділильному циліндру оброблюваного колеса [3].

З побудов приведених на мал.2 випливає, що на початку робочого ходу кут схрещування осей шевера і заготівлі Σ' утворений проекцією

$$\operatorname{tg} \Delta V = KK^1 / P_1K^1; \operatorname{tg} \Delta V = \operatorname{tg} \gamma \sin \Sigma'. \quad (1)$$

У формулі (1) Σ' – дійсне значення кута схрещування осей заготівлі й інструмента на по-

чатку циклу обробки, град. Крім того, з побудов мал.2, 3

$$\operatorname{tg} \Sigma' = \operatorname{tg} \Sigma \cos \gamma; \sin \Sigma' = (\operatorname{tg} \Sigma \cos \gamma) / \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \Sigma \cos^2 \gamma}, \quad (2)$$

З побудов на мал. 2 відстані $O_1O_2 = r_{11} + r_0$, $O_1K = r_{11} + r_0 - \Delta a$, де $r_{11} = r_1 / \cos^2 \Sigma$ є приведеним радіусом кривизни оброблюваної заготівлі, мм; r_1 – радіус ділильної окружності заготівлі, мм; r_0 – радіус ділильної окружності шевера, мм; Δa – зміна положення центра схрещування осей заготівлі й інструмента, мм.

$$\cos \gamma = \frac{r_0 \cos^2 \Sigma + r_1 - \Delta a \cos^2 \Sigma}{r_0 \cos^2 \Sigma + r_1}, \operatorname{tg} \gamma = \frac{\cos \Sigma \sqrt{\Delta a (2(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1) - \Delta a \cos^2 \Sigma)}}{r_0 \cos^2 \Sigma + r_1 - \Delta a \cos^2 \Sigma}. \quad (3)$$

Підставляючи вираження (2) і (3) у формулу (1) одержуємо вирази для визначення кута непаралельності осей, перекоосу осей шевера і заготівлі:

$$\operatorname{tg} \Delta V = \sin \Sigma \sqrt{\frac{\Delta a (2(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1) - \cos^2 \Sigma)}{(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1)(1 + \operatorname{tg}^2 \Sigma)(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1 - \Delta a \cos^2 \Sigma)}}; \quad (4)$$

$$\sin n \Sigma' = \operatorname{tg} \Sigma \sqrt{\frac{r_0 \cos^2 \Sigma + r_1 - \Delta a \cos^2 \Sigma}{(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1)(1 + \operatorname{tg}^2 \Sigma)}}; \quad (5)$$

$$\Delta \Sigma = \Sigma' - \Sigma. \quad (6)$$

У процесі шевінгування методом «короткого ходу» найбільше значення кут ΔV досягає при врізанні і виході шевера (т. P_1 і P_3), і наближається до нульового значення при максимальних деформаціях технологічної системи (т. P_2). У цих крапках похибка напрямку зуба буде максимальною, тому що в результаті виникаючого перекоосу осей шевера і заготівлі відбудеться зміна площі плями контакту. Довжина плями контакту в цьому випадку зменшується, що приводить до врізання ріжучих зубців шевера на велику глибину на початку і кінці циклу обробки. Довжина плями контакту відповідно до робіт [2,5] залежить від параметрів верстатного зачеплення. Для випадку обробки шевінгуванням методом короткого ходу, виникаюча похибка напрямку зуба [6, 7] буде визначатися залежністю:

$$F_{\beta_{1,2}} = l_k \operatorname{tg} \Delta \Sigma + 2b_1 \operatorname{tg} l n \operatorname{tg} \Delta V, \quad (7)$$

де $F_{\beta_{1,2}}$ - похибка напрямку зуба, мм; α_n - нормальний кут зачеплення, град; b_1 - ширина зубцюватого вінця заготівлі, мм; ΔV - величина кута непаралельності осей, град.; $\Delta \Sigma$ - величина кута перекоосу осей шевера і заготівлі, мм.

Довжина плями контакту, відповідно до роботи [7] визначається залежністю:

$$l_k = \sqrt{\frac{2gz}{\operatorname{tg} \ln(\operatorname{tg} \beta_1 - \operatorname{tg} \beta_0)}}, \quad (8)$$

де Z - величина припуску, що видаляється, мм; β_1 - кут нахилу лінії зуба оброблюваного колеса, град; β_0 - кут нахилу лінії зуба інструмента, град; g - довжина лінії зачеплення, мм.

Після підстановки в залежність (7) виражень (4), (6), (8) одержуємо:

$$F_{b_2} = \frac{\operatorname{tg}(\Sigma' - \Sigma) \sqrt{2gz}}{\operatorname{tg} \ln(\operatorname{tg} \beta_1 - \operatorname{tg} \beta_0)} + 2b_1 \operatorname{tg} l n \sin \Sigma \sqrt{\frac{\Delta a (2(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1) - \cos^2 \Sigma)}{(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1)(1 + \operatorname{tg}^2 \Sigma)(r_0 \cos^2 \Sigma + r_1 - \Delta a \cos^2 \Sigma)}}. \quad (9)$$

Для залежності (9) величина g з достатньою точністю [5, 6] може бути розрахо-

вана по формулі:

$$g = \frac{\sqrt{dw_1^2 - db_1^2}}{2 \cos \ln \sin \beta_1} + \frac{\sqrt{dw_0^2 - db_0^2}}{2 \cos \ln \sin \beta_0}, \quad (10)$$

де dw_1 і dw_0 - діаметри початкових циліндрів заготівлі й інструмента, мм; dw_1 і dw_0 - діаметри основних циліндрів заготівлі й інструмента, мм.

Отримані залежності (4), (5), (6), (9) дозволяють оцінити вплив параметрів верстатного зачеплення на похибку напрямку зуба при шевінгуванні методом «короткого ходу», величину кута непаралельності осей, зміну кута схрещування осей шевера і заготівлі в процесі обробки. Проведені аналітичні й експериментальні дослідження дозволяють зробити висновок про те, що при шевінгуванні методом «короткого ходу» виникаючі на початку і кінці циклу обробки деформації технологічної системи призводять до зміни кута схрещування осей шевера і заготівлі, і як наслідок виникненню похибки напрямку зуба. Зміна величини припуску, що видаляється, у процесі обробки приводить до зсуву плями контакту уздовж зуба заготівлі, зміні площі плями контакту. Найбільша похибка напрямку зуба після обробки буде відповідати заготівлям, маючим найбільше радіальне биття, коливання припуску під обробку. Зменшення похибки напрямку зуба при обробці методом «короткого ходу» досягається при збільшенні числа зубів інструмента, числа проходів. Найменша похибка напрямку зуба відповідає обробці з малими кутами схрещування осей заготівлі й інструмента.

Література: 1. Калашников С.Н., Калашников А.С. Изготовление зубчатых колес. -М. Высшая школа. 1985г. – 223с. 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). Машиностроение. Ленинград. 1968 г. 308с. 4. Люкшин В.С. Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов. М.: Машиностроение, 1967. – 372с. 5. Уминский С.М. Дослідження зміни міжосьової відстані сполучених поверхонь інструмента й оброблюваного колеса при шевінгуванні. Вісник інженерної академії України №3, 2001р. Частина 2. КВ 2635. С. 552-555. 6. Соколов В.Н. Повышение эффективности шевингования зубчатых колес. Сборник 1. Пути повышения точности обработки зубчатых колес. Машизд, 1954.

УДК621.91.002(075)

СТРУКТУРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Гусарев В.С., кандидат технических наук (г. Одесса, Украина)

The structural optimized technology of the process and technological system.

При технологическом проектировании существует по крайней мере две задачи структурного синтеза и оптимизации структуры.

Первая задача встречается в практике, когда необходимо выполнить проектирование "нового" технологического процесса (маршрута) и "нового" оборудования.

Вторая задача встречается в условиях существующего производства, когда технологический процесс разрабатывают на имеющийся парк оборудования.

Решение первой задачи.

Эта задача состоит из двух частей. В первой выполняется синтез технологического процесса (оптимизация маршрута); во второй моделирование технологической системы и алгоритмизация ее функционирования (оптимизация системы).

Часть первая. Исходная информация для этой задачи задается двумерной структурой поверхностей обрабатываемого объекта. На основании такого представления с по-

мощью правил соответствия и процедур трансляции формируется матрица технологических операций. В ней каждая операция формально и фактически соответствует представляемой обработанной поверхности технологического объекта. Далее матрица операций представляется графом Ферри - нулевым графом. Этот граф изображает двумерное поле операций - каждая вершина графа отображает технологическую операцию.

Пример:

$$\begin{array}{ccc} \left| \begin{array}{cccc} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \end{array} \right| & \left| \begin{array}{cccc} A_1 & B_1 & C_1 & D_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 & D_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 & D_3 \end{array} \right| & \left| \begin{array}{cccc} \oplus & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \oplus \end{array} \right| \end{array}$$

Матрица поверхностей

Матрица операций

Граф Ферри

Как указывалось [1], массив операций может формировать определенное число маршрутов технологических операций, общее число которых определяется исходя из условия фиксирования первой (начальной) операции и последней (конечной) операции (на графе обозначены кружками) по формуле:

$$M = \frac{(\sum X - 2)!}{(i_a - 1)! i_b! i_c! (i_d - 1)!} = \frac{(12 - 2)!}{2!3!3!2!} = 252 \cdot 10^2,$$

где - $\sum X$ - общее число операций; i - число операций в соответствующем столбце матрицы операций или орграфе Ферри.

Естественно, такое огромное число вариантов может быть просмотрено с помощью ЭВМ и процедур диалогового программирования. Для уменьшения размерности задачи рекомендуем по методу декомпозиции разрезать матрицу операций на две равных и симметричных:

$$\begin{array}{cc|cc} A_1 & B_1 & C_1 & D_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 & D_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 & D_3 \end{array} \quad \left| \begin{array}{cc|cc} \oplus & \bullet & \oplus & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \oplus & \bullet & \oplus \end{array} \right|$$

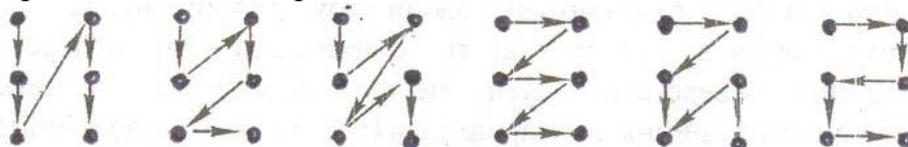
Тогда размерность (число вариантов маршрута) существенно сократится.

$$M_1 = M_2 = \frac{(\sum X - 2)!}{(i - 1)!(i - 1)!} = \frac{4!}{2!2!} = 6.$$

Общее количество вариантов $M_0 = M_1 \cdot M_2 = 6 \cdot 6 = 36$.

Таким образом, декомпозиция массива операций привела к существенно более низкой размерности вариантов технологических маршрутов. Изобразим технологический маршрут в виде ориентированного графа Гамильтона. Граф Гамильтона такой, в котором дуги проходят каждую вершину по одному разу, здесь точки - операции, дуги - переход от одной операции к другой.

Рассмотрим эти шесть вариантов:



Из представленных вариантов более других требованиям традиционной технологии (последовательность черновых - получистовых - чистовых операций) соответствует четвертый.

Дальнейшая процедура разработки (синтеза) системы требует принятия прин-

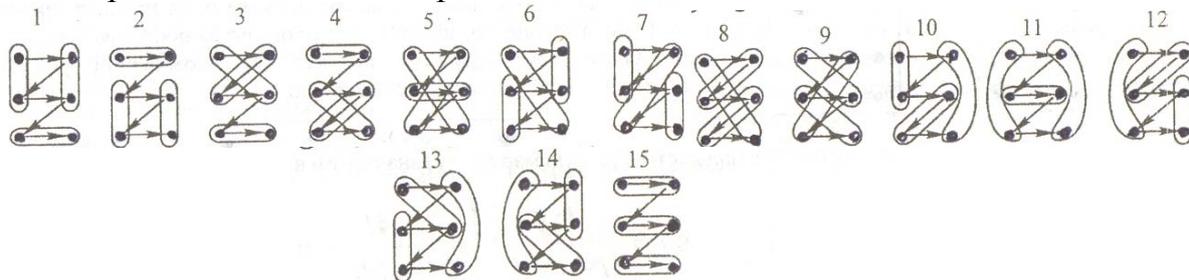
ципа размещения операций по элементам технологической системы, т.е. по станкам.

Сформулируем основные принципы: каждый элемент системы (станок) содержит равное (кратное) число операций; каждый элемент системы содержит разное число операций, но время их функционирования (или суммарное время операций в каждом элементе системы) одинаково; каждый элемент системы выполняет определенную функцию (например, обработка – черновая, получистовая, чистовая) или определенный вид операции (например, фрезерование, растачивание и т.п.).

Зададимся принципом: в каждом станке выполняется по две операции. Тогда способов размещения технологических операций ΣX по станкам n по операции k

$$C = \frac{(\sum X)!}{n!(k!)^n} = \frac{6!}{3!(2!)^3} = 15.$$

Приведем их. Для этого разделим поле графа технологического маршрута границами на три станка по две операции в каждом.

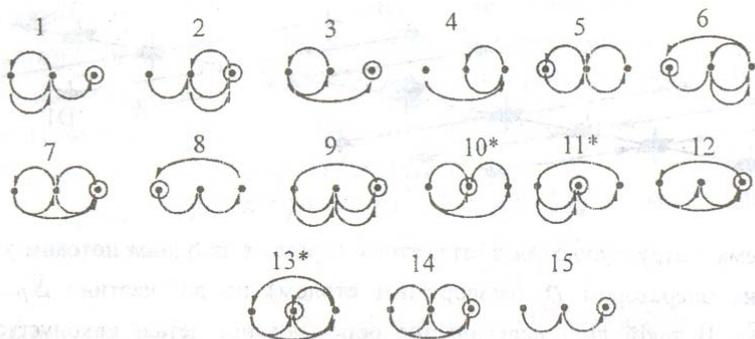


Для того чтобы определить оптимальное размещение операций, надо помнить, что критерием оптимальности является число переходов технологического объекта со станка на станок. Естественно, что это условие определяет цель оптимизации структуры $optH=(S-1) \rightarrow min$, где H - число переходов объекта по элементам технологической системы; S - число элементов (станков) технологической системы.

На этом этапе синтеза строим для каждой структуры ориентированный граф Эйлера. Граф Эйлера, в котором каждой дуге соответствует ровно одно действие, один переход, в этом графе вершины - станки, а дуги - перемещения детали со станка на станок в соответствии с принятым маршрутом, т.е следованием операций. Рассматривая полученные схемы ориентированных графов, можно сделать следующие выводы:

– схемы 5,6,8,10,11,13 (отмечены звездочкой) не соответствуют первоначальному условию, интерпретируемому как начало и конец процесса, которые не должны быть на одном станке.

- схемы 3,4 - близки к оптимуму.
- схема 15 - оптимальна, т.к. $H=2$.



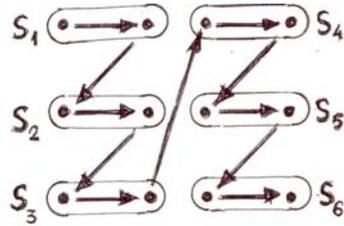
Напомним, исходная схема процесса была разбита на две симметричные, поэтому упомянутое преобразование и выбор распространяется и на вторую ее часть. Теперь произведем композицию схем из обеих частей и получим следующее решение:

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
H	4	4	3	3	4	5	5	3	5	4	4	4	5	5	2

* * * * *



орграф Гамильтона
(процесс)



граф Эйлера
(система)

Часть вторая.

Перейдем к рассмотрению структуры системы в операторном представлении:

$$S_1=(A_1B_1), S_2=(A_2B_2), S_3=(A_3B_3);$$

$$S_4=(C_1D_1), S_5=(C_2D_2), S_6=(C_3D_3).$$

Считая, что межстаночная связь выполнена линейным транспортером p_α , а станки - агрегатные двусторонние (горизонтальные) получим следующее решение:

Схема со структурой автоматической линии (АЛ) из агрегатных станков с одним потоком, условно разделенная оператором P_β (поворотным столом) на два участка $S_1 \dots S_3$ и $S_4 \dots S_5$. В такой линии перемещение обрабатываемой детали происходит без спутника.

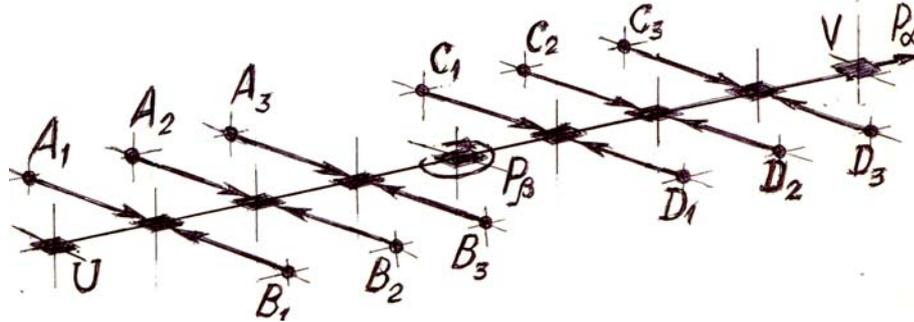


Схема со структурой автоматической линии (АЛ) из агрегатных станков с одним потоком, условно разделенная оператором P_β (поворотным столом) на два участка $S_1 \dots S_3$ и $S_4 \dots S_5$. В такой линии перемещение обрабатываемой детали происходит без спутника.

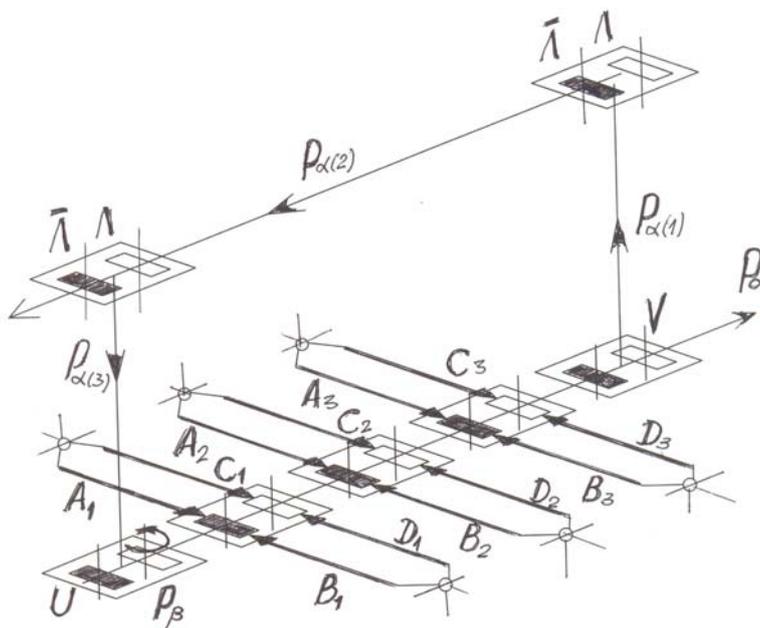
Алгоритм работы АЛ следующий:

$$U p_\alpha (A_1 \circ B_1) p_\alpha (A_2 \circ B_2) p_\alpha (A_3 \circ B_3) p_\alpha P_\beta p_\alpha (C_1 \circ D_1) p_\alpha (C_2 \circ D_2) p_\alpha (C_3 \circ D_3) p_\alpha V.$$

В операторной формуле алгоритма кружок (\circ) обозначает одновременность действий операторов. Характеристика системы (при $1H=1EB$) $\Pi = 30$, $\tau_c = 2EB$, $E = 9$, $F = 1$, $G = 16$; $H = 23$, $S=6$, где $1H=1EB$ – одно действие имеет длительность в одну единицу времени (ЕВ); Π – производительность системы; τ_c – длительность цикла; E – число позиций (ячеек); F – число потоков; G – число механизмов; H – число действий; S – число станков.

Рассматривая структуру технологической системы, следует указать на особенности выполнения операций на первом $S_1 \dots S_3$ и втором $S_4 \dots S_6$ участках, которые заключаются в том, что после чистовых операций на S_3 выполняются черновые операции на S_4 . Это нарушает третий принцип следования операций в маршруте. Выходом из этого является супер позиция участков и станков.

С1=(A1C1,B1D1), S2=(A2C2,B2D2), S3=(A3C3,B3D3).



$$S_1=(A_1C_1, B_1D_1), S_2=(A_2C_2, B_2D_2),$$

$$S_3=(A_3C_3, B_3D_3).$$

Получаем следующую схему автоматической линии (АЛ).

Эта схема (АЛ), структура которой содержит наложенные потоки (F2). Перемещение изделия проис-

ходить спільно з 2-х місним супутником, який со второго потока разгружает отработанное изделие (V), затем перемещается в исходное положение, где производится перезагрузка с поворотом p_β второго потока и загрузка (U) на первый поток изделия.

Алгоритм работы АЛ:

$$(Vp_\beta U^\circ) p_\alpha^\circ ((A_1^\circ C_1)^\circ (B_1^\circ D_1)) p_\alpha^\circ ((A_2^\circ C_2)^\circ (B_2^\circ D_2)) p_\alpha^\circ ((A_3^\circ C_3)^\circ (B_3^\circ D_3)) p_\alpha^\circ (\Lambda^\circ V) p_{\alpha(1)}^\circ (\Lambda^\circ \Lambda) p_{\alpha(2)}^\circ (\Lambda^\circ \Lambda) p_{\alpha(3)}^\circ$$

Характеристика системы следующая: $\Pi = 30$, $\tau_c = 2EB$, $E = 7$, $F = 2$, $G = 9$, $H = 24$, $S = 3$. Данная система оптимальна в связи с тем, что в ней число станков уменьшено по сравнению с предыдущей в 2 раза.

Вывод: Структура процессов и технологических систем, является оптимальной при ее реализации минимальными средствами. Предложенная методика оптимизации структуры позволяет производить моделирование технологического процесса и технологической системы с целью минимизации структурных элементов.

Литература: 1. Якимов О.В., Гусарев В.С. и др. –Технология автоматизованного машинобудування .- Одесса, ОДПУ, 1999,- 402 с. 2. Якимов А.В., Гусарев В.С., Линчевский П.А. – Технология автоматизированного машиностроения.- Киев.,УСДО, 1993.-440с.рус.

УДК 621.822:681.2:369.64

ТЕХНОЛОГІЧНЕ КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ МІКРОГЕОМЕТРІЇ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ КІЛЕЦЬ РОЛИКОПІДШИПНИКІВ НА ТОКАРНО-АВТОМАТНИХ ОПЕРАЦІЯХ

Марчук В.І., докт. техн. наук, Заблоцький В.Ю. (м. Луцьк, Україна)

The modelling of the mechanism of shaping of parameters of a microtopography of a surface allows to decide a series of applied problems of development and optimization of technology формообформування of surfaces of solid of revolutions. The developed mathematical models and the technological methods of management of an exactitude of the form, sinuosity and parameters of a grain allow quantitatively to evaluate a character each from managing influences of technology factors to parameters of quality of surfaces of detailses.

Сучасні принципи і підходи до проблеми формування макро- та мікрорельєфу робочих поверхонь деталей з необхідними параметрами і експлуатаційними властивостями базуються на основних положеннях теорії і практики технологічної спадковості відображених в роботах О.О. Маталіна [4], О.В. Якімова [6], П.І. Ящеріцина [7], які підтвердженні багатолітнім виробничим досвідом і останніми дослідженнями [1, 3, 5].

Керування параметрами якості можливо як на стадії проектування технології при технологічній підготовці виробництва, так і при безпосередньому керуванні технологічними процесами й операціями. Аналіз і оптимізація варіантів технології на стадії її проектування важливіший, оскільки при цьому скорочуються терміни вибору оптимального варіанту, знижуються витрати підготовки виробництва нових виробів і спрощуються технічні засоби, що безпосередньо керують металорізальним устаткуванням. Для здійснення прогнозу на стадії підготовки виробництва й автоматичного керування параметрами якості в процесі обробки необхідна побудова математичної моделі формування параметрів якості. На рис. 1 показана схема ординарного

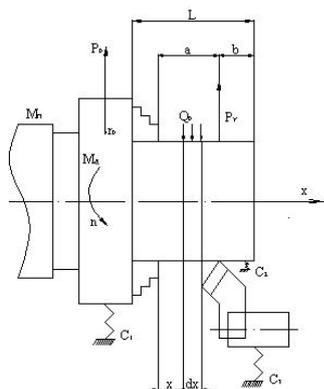


Рис. 1. Схема точіння заготовки.

точіння заготовки, до патрона прикладена збуджуюча сила $P(t) = P_0 \cdot \text{const}$, обумовлена дисбалансом патрона, амплітудне значення якої визначається залежністю

$$P_0 = M_\partial \cdot \omega^2 \cdot r_\partial, \quad (1)$$

де M_∂ - маса дисбалансу, r_∂ - відстань маси дисбалансу від осі обертання, ω - кругова частота обертання патрона. Для наступних розрахунків використовуються параметри, приведені на рис. 3.1: a - відстань від місця закріплення заготовки до місця прикладення радіальної складової сили різання; M_n - маса патрона; M_p - маса різцетримача; C_1, C_2, C_3, C_4 - жорсткості відповідно передньої і задньої бабок, різцетримача, кутова твердість передньої бабки; M_0, Q_0, q_0 - згинальний момент, перерізуюча сила розподіленого навантаження елемента одиничної довжини в довільному перетині відповідно. Символом C_0 відзначена зміна сили P_y , що припадає на одиницю глибини різання. У зв'язку з наявністю нерівномірних переміщень заготовки від вершини різця в процесі точіння буде змінюватися і глибина різання t , а відповідно, і сила P_y . Взаємні переміщення y_i заготовки y_{i1} і вершини різця y_{i2} , що визначають утворені при точінні нерівності поверхні, представляються як

$$y_i = y_{i1} + y_{i2}. \quad (2)$$

Для одержання значень масиву $\{y_i\}$ взаємних переміщень заготовки і вершини різця розглянемо рівняння рівноваги елемента заготовки (рис. 1) одиничної довжини в довільний момент часу, зневажаючи силами інерції частин заготовки в їхньому русі уздовж осі в зв'язку з поворотом поперечних перерізів

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} (EI \frac{\partial^2 y_1}{\partial x^2}) + m \frac{\partial^2 y_1}{\partial t^2} = 0, \quad (3)$$

де m - маса елемента заготовки одиничної довжини.

Рівняння рівноваги різцетримача з закріпленим різцем з врахуванням виразу (2) має вигляд:

$$M_p \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} + C_3 y_2 - C_0 (y_1 + y_2) = 0. \quad (4)$$

Спільне рішення рівнянь (2), (3), (4) при $x=a$ призводить до системи лінійних рівнянь [2], з яких випливає

$$y = \frac{\det \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{14} \\ R_{21} & R_{22} & R_{24} \\ R_{31} & R_{32} & R_{34} \end{vmatrix}}{\det \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{vmatrix}}, \quad (5)$$

де R_{ij} - елементи матриці коефіцієнтів системи лінійних рівнянь, розрахункові значення яких мають вигляд:

$$R_{11} = EI\alpha^3 K_2(\alpha L) + (M_n \omega^2 - C_1) K_1(\alpha L) - C_2 K_2(\alpha L) - \frac{M_n \omega^2 - C_1}{C_2 \alpha^3 EI} K_4(\alpha L);$$

$$R_{12} = EI\alpha^2 K_3(\alpha L) + \alpha(I\omega^2 - C_5) K_4(\alpha L) - C_1 K_2(\alpha L) - \frac{C_1(I\omega^2 - C_5)}{\alpha^2 EI} K_3(\alpha L);$$

$$R_{13} = C_0 [K_1(\alpha B) - \frac{C_1}{\alpha^3 EI} K_4(\alpha B)]; \quad R_{14} = P_0 [C_1 K_4(\alpha L) / \alpha^3 EI - K_1(\alpha L)];$$

$$R_{21} = EI\alpha^2 K_3(\alpha L) + \frac{1}{\alpha}(M_n \omega^2 - C_1)K_2(\alpha L); R_{22} = EI\alpha K_4(\alpha L) + (I\omega^2 - C_5)K_1(\alpha L);$$

$$R_{23} = C_0 K_2(\alpha B) / \alpha; R_{24} = -P_0 K_2(\alpha L) / \alpha; R_{31} = K_1(\alpha a) + \frac{M_n \omega^2 - C_1}{\alpha^3 EI} K_4(\alpha a);$$

$$R_{32} = \frac{K_2(\alpha a)}{\alpha} + \frac{I\omega^2 - C_5}{\alpha^2 EI} K_3(\alpha a); R_{33} = -(1 + \frac{C_0}{C_4 - M_p \omega^2}); R_{34} = -P_0 \frac{K_4(\alpha a)}{\alpha^3 EI}.$$

З урахуванням числових значень припустимої невірніваженості токарних патронів, твердості елементів верстата при зміні параметра шорсткості з кроком S , рівним величині подачі при точінні, згідно рівняння (5) чисельними методами на ЕОМ отримані величини масиву $\{y_i\}$ взаємного переміщення заготовки і вершини різця. При моделюванні шорсткої поверхні до отриманого набору дискретних ординат, що імітують положення різця відносно заготовки в одному її перетині з кроком подачі S , графічно або аналітично додають ординати профілю вершини різця в плані.

Похибка моделювання параметрів шорсткості в порівнянні з експериментальними даними в середньому не перевищує 30%. Зміна параметрів моделі в рівнянні (5) дозволяє моделювати профілограми, що імітують поверхні, отримані при зміні технологічних факторів. Зміна факторів проводилась в діапазонах рекомендованих режимів різання з виключенням можливості з'явлення вібрацій навколорезонансних режимах і наростоутворення.

Особливість моделювання шорсткості поверхні полягає в специфіці поняття "шорсткість", яке виключає ділянки поверхні з кроками, більшими за крок шорсткості, тобто хвилястість. При наближеному моделюванні з моделі виключаються згинаючі коливання заготовки котрі спричиняють хвилястість поверхні. Врахування згинаючих коливань заготовки при точінні призводить до значного ускладнення математичного апарату при визначенні ординат переміщень масиву $\{Y_i\}$ за виразом (5). При використанні для автоматичного керування технологічним устаткуванням і процесами мікро-ЕОМ і мікропроцесорів, що не мають математичного, можливі деякі спрощення математичної моделі. Аналіз виразу (5) і його складових показує, що в багатьох випадках точіння не всі складові співвимірно впливають на результат. З достатньою для практичних розрахунків ступенем точності, а також, з огляду на технічні можливості метрологічних засобів, методику розрахунку пружних переміщень технологічної системи при точінні можна спростити.

У спрощеній моделі маса заготовки зосереджена і приведена в точку прикладання складової P_y сили різання з коефіцієнтами приведення δ_{00} і δ_{01}

$$\delta_{00} = \frac{a^2(L-a)^2}{3EIL} + \frac{L-a}{LC_1} + \frac{a}{L}(\frac{a}{LC_2} - \frac{L-a}{LC_1}), \quad \delta_{01} = (L-a)/LC_1. \quad (6)$$

Коефіцієнти приведення обрані з умови, що частота власних коливань приведеної системи буде така ж, як і в основній моделі. При позначенні дійсної маси вала m_δ приведена маса вала може бути визначена зі співвідношення

$$m_\delta = m_\delta L^3 / \pi^4 EI \delta_{00}. \quad (7)$$

Тому що частота зміни твердості заготовки вища частоти її власних коливань, переміщення заготовки у точці прикладання складової сили різання складуть

$$y = y_c + y_1 + y_2, \quad (8)$$

де y_c - статичне переміщення.

$$y_c = C_0 \pm (\delta_{00} + 1/C_3). \quad (9)$$

Пружні переміщення заготовки від дії динамічних факторів складуть

$$y_1 = \delta_{01}P_0 + \delta_{00}[(y_1 + y_2)C_0 + m_e\omega^2 y_1]. \quad (10)$$

Як друге рівняння системи використовуємо вираз (4), що після диференціювання і перетворень має вид

$$-M_p\omega^2 y_2 + C_0(y_1 + y_2) - C_3 y_2 = 0. \quad (11)$$

Перегрупування виразів (10) і (11) приводять до системи двох лінійних рівнянь, з яких знаходиться шукане переміщення відповідно до виразу:

$$y_1 + y_2 = \frac{\det \begin{vmatrix} F_{11} & F_{13} \\ F_{21} & F_{23} \end{vmatrix}}{\det \begin{vmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{vmatrix}}, \quad (12)$$

де

$$\begin{aligned} F_{11} &= 1 - m_e\omega^2\delta_{00}; & F_{21} &= -C_3 + M_p\omega^2; \\ F_{12} &= -\delta_{00}C_0; & F_{22} &= C_0 + C_3 - M_p\omega^2; \\ F_{13} &= \delta_{01}P_0; & F_{23} &= 0. \end{aligned}$$

Зміною параметрів технологічної системи L, a, I, P_0, P_y у виразах (8), (10), (12) можна приблизно моделювати поперечну шорсткість, що виходить при точінні валів.

Описаний підхід аналітичного представлення параметрів мікрогеометрії використанні для моделювання токарних багатоінструментних операцій та для прогнозування якості оброблених на токарних автоматах поверхонь.

Література: 1. Дальский А.М. и др. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве/ А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев и др.: под ред. А.М. Дальского. – М. Изд-во МАИ, 2000. – 364 с. 2. Лакс В.К., Тараненко В.А., Ямпольский Л.С. Повышение точности и производительности токарной обработки нежестких валов посредством адаптивного управления. – Станки и инструмент, 1976, №1. – С. 5-6. 3. Марчук В.І., Заблоцький В.Ю., Лапченко Ю.С. Технологічне керування віброакустичними характеристиками роликотіпшипників в умовах гнучких виробничих систем // Сучасні технології виробництва в розвитку економічної інтеграції та підприємництва: Матеріали І Українсько-Польської наукової конференції 16-18 жовтня 2003 р. смт. Сатанів. – Хмельницький: Технологічний університет Поділля, 2003. – С. 103–104. 4. Маталін А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин. К.: Техника, 1971. – 144 с. 5. Рыжов Э.В., Суслов А.Г., Федоров В.П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с. 6. Якимов А.В. и др. Технология машиностроения: Учебник / А.В. Якимов, А.А. Якимов, В.П. Ларшин, В.Н. Свирцев. – Пермь, 2002. – 563 с. 7. Ящерицин П.И. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства шлифованных деталей. – Минск: наука и техника, 1971. – 212 с.

УДК 681.31+621.941.236

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ КЕРУВАННЯ ВІБРОАКУСТИЧНИМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДОРІЖОК КОЧЕННЯ КІЛЕЦЬ
РОЛИКОПІДШИПНИКІВ НА ОПЕРАЦІЯХ БЕЗЦЕНТРОВОГО
ШЛІФУВАННЯ**

Марчук В.І., докт. техн. наук, **Денисюк В.Ю.,** канд. техн. наук, **Лапченко Ю.С.**
(м. Луцьк, Україна)

Technological management of vibroacoustic characteristics tracks of rings of rollerbearings on operations of without-center grinding.

Improvement and stabilization of vibroacoustic characteristics of bearings may be

achieved as a complex construction and technological provision of their surfaces macro- and microrelief parameters.

Вібрації підшипників кочення характеризуються щільним частотним складом і вважаються основним джерелом вібрацій валів підшипникових опор. Природа виникнення вібрацій підшипників кочення пояснюється їх конструктивними особливостями, похибками виготовлення та умовами експлуатації тобто знаходиться в залежності від конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів. Оскільки ці три групи факторів взаємопов'язані між собою то проблему зниження рівня і характеру вібрацій підшипникових вузлів і підшипників необхідно розглядати комплексно з урахуванням конструктивно-технологічних особливостей, умов експлуатації, його призначення, технічних умов на виготовлення, типу виробництва.

При перекочуванні тіл кочення під навантаженням, внаслідок змінності реакцій контактів між деталями підшипників, виникають циклічні зміни жорсткості підшипника. Внаслідок цього навіть геометрично ідеальний підшипник здатен генерувати вібрацію. Вібрації, обумовлені циклічною зміною жорсткості підшипників, належать до параметричних коливань [1].

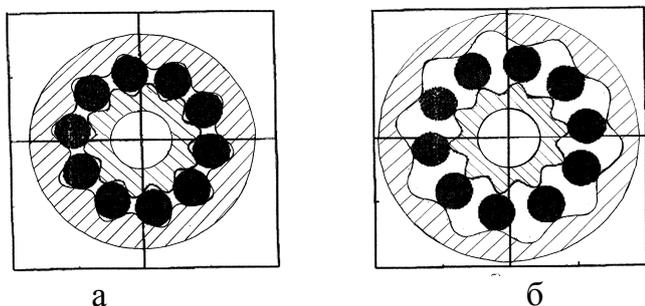


Рис. 1. Геометрична модель підшипника за умови співпадання хвилястості внутрішнього k_{iB} і зовнішнього k_{i3} кілець з числом тіл кочення $z = k_{iB} = k_{i3}$: а - теоретично найменший діаметр зовнішнього кільця; б - теоретично найбільший діаметр зовнішнього кільця.

На рис. 1. показана геометрична модель підшипника з хвилястістю внутрішнього і зовнішнього кілець. Схема ілюструє цілком можливий випадок у функціонуванні підшипника, коли хвилястість зовнішнього кільця за числом хвиль співпадає з хвилястістю внутрішнього кільця, а число тіл кочення в підшипнику теж рівне числу хвиль на кільці. Очевидно така форма геометричної моделі відповідає найгіршій динамічній характеристиці підшипника, коли амплітуда вібрації досягатиме максимального значення.

Викладений принцип геометричного моделювання функціональної структури підшипника покладений в основу селективного складання роликотілопідшипників за формами полярних діаграм доріжок кочення внутрішнього і зовнішнього кілець. Основний принцип такого складання полягає в такому підборі комплектів кілець, який забезпечує різницю P_z між хвилястістю внутрішнього і зовнішнього кілець рівну непарному числу різниці $k_{i3} \pm k_{iB} = P_z$, тобто значення $P_z = 3, 5, 7 \dots$

На вібрацію підшипників певним чином впливають дефекти комплекту тіл кочення. Так всі парні порядки похибок форми та хвилястості (ξ) викликають радіальну вібрацію з частотами $\xi \cdot f_p \pm f_2$ і осьову – з частотами $\xi \cdot f_p$. Різномірність тіл

Всі види вібрацій, пов'язані із конструктивними особливостями підшипників кочення, проявляються на чітко визначених частотах обертання роликів, внутрішнього та зовнішнього кілець і не мають суттєвого впливу на формування вихідної точності підшипників та їх вузлів.

Точність обертання підшипників кочення насамперед визначається рівнем низькочастотних вібрацій [1]. Амплітуда цих коливань може сягати 10÷15 мкм для підшипників нормальної точності, 2÷5 мкм - для прецизійних і 1÷3 мкм - для надпрецизійних.

кочення викликає тільки радіальні вібрації з частотою f_2 . Але зазвичай для більшості підшипників вплив похибок комплексу тіл кочення на рівень вібрацій підшипників значно менший, ніж вплив похибок кілець підшипника. Тому з цієї причини недоцільно розглядати технологічні особливості формоутворення тіл кочення.

Радіальне та осьове навантаження визначає умови контактування тіл кочення з кільцями підшипників і може бути причиною виникнення вібрацій навіть при мінімальних похибках виготовлення деталей підшипників. У реальному підшипнику ступінь впливу навантажень на формування спектру вібрацій залежить від кількості тіл кочення, що знаходиться в контакті. Цей вплив є суттєвим у випадку сприйняття навантаження 30-40 % загальної кількості тіл кочення в комплекті і менш суттєвим – при навантаженні 70-80 %. У радіально-упорних роликкових підшипниках зменшення кількості не навантажених тіл кочення, а відповідно і рівня вібрацій, досягається шляхом збільшення осьового навантаження на підшипник. При повному забезпеченні контакту тіл кочення з кільцями подальше збільшення осьового навантаження не приводить до зменшення рівня вібрацій. Із збільшенням частоти обертання здійснюється зсув частотних складових спектру вібрацій у високочастотну область. При цьому зміна рівня вібрацій залежить від наближеності частот збудовуючих зусиль до власних частот, тобто можливості виникнення резонансів.

Одним із технологічних заходів, що зменшує вплив вібрацій цього типу, є попередня прикатка підшипників [2]. В процесі тривалої технологічної прикатки з технологічними мастилами при підвищених навантаженнях здійснюється зминання вершин мікровиступів шорсткої поверхні, окислення і стабілізація поверхневих шарів контактуючих деталей. Локальні дефекти на поверхнях кочення – тріщини, вм'ятини, сколи, практично не змінюють загальний рівень його вібрацій. Але на відміну від вібраційного сигналу справного підшипника у спектрі вібрацій дефектного підшипника з'являються окремі складові збурення, частота яких залежить від частоти обертання підшипника (n), а амплітуда – від розміру пошкодження.

Найменш вивчений на сьогоднішній час є механізм змін початкових вібраційних характеристик підшипників після їх монтажу в підшипникових вузлах. Вивчення причин таких змін експериментальним шляхом пов'язано з проблемою ідентифікації дійсного стану механічних взаємозв'язків контактуючих поверхонь кілець і тіл кочення підшипника в опорі. Крім того відсутність достовірних способів оцінки якості складання та монтажу підшипників і підшипникових опор приводять до того, що стан підшипника в опорі стає невизначеним. Насамперед це стосується монтажних навантажень, дійсних значень перекосів кілець, додаткових спотворень форми поверхонь бігових доріжок кілець тощо. Вирішення цієї проблеми потребує комплексного теоретико-експериментального дослідження з використанням методів гармонічного аналізу віброакустичних характеристик зібраних підшипників та їх вузлів.

При дотриманні всіх вимог технологічного характеру щодо виготовлення спряжених із підшипниками деталей та складання підшипникових вузлів, основними причинами змін початкових вібраційних характеристик підшипників лишаються лише монтажні перекося кілець та фактичні ексцентриситети розміщення поверхонь доріжок кочення кілець відносно номінальних положень осей шпинделя і корпуса. Але, ні одна з цих похибок безпосередньо не викликає вібрацій на нормованих частотах $2 \cdot f_0$ та $3 \cdot f_0$. А той факт, що при радіальному навантаженні підшипникових

опор зростання рівня вібрацій відбувається за рахунок зростання амплітуд саме цих частотних складових, дозволяє зробити припущення, що однією з вагомих причин зміни початкових вібраційних характеристик підшипників можуть бути монтажні навантаження підшипників викликані перекосами кілець, похибками розміщення спряжених посадочних поверхонь підшипників, вала і корпусу, а також похибками форми та хвилястістю спряжених поверхонь. Крім того, факт зміни початкових вібраційних характеристик підшипників після їх монтажу свідчить про необхідність комплексного підходу до вивчення механізму впливу фізичних та технологічних процесів на формування вихідної точності підшипникових вузлів на опорах кочення.

Література: 1. Бальмот В.Б., Самотин О.Н., Варламов Е.Б., Авдеев А.М. Вибрация и шум подшипников качения: Обзор. – М.: Цинитэавтопром, 1987. – 125 с. 2. Журавлев В.Ф., Бальмот В.Б. Механика шарикоподшипников гироскопов. – М.: Машиностроение, 1986. – 248 с.

УДК 621.923

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – СОСТАВЛЯЮЩАЯ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

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

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

The laser technology of volumetric formation of the prototype or detail is submitted.

Квантовые генераторы, созданные в результате фундаментальных научных исследований, обладают новизной, эффективным применением и самым широким распространением в различных отраслях техники. То есть они относятся к составляющим инновационных процессов лазерных технологий.

Одним из ярких примеров достижений лазерной технологии последних десятилетий является процесс рапид прототипинг – RP [1]. Новые этапы развития науки, информатики, техники CNC, лазерной технологии и т.д. позволили перейти к интегрированным генеративным способам ускоренного формообразования, избавиться от нескольких фаз создания прототипов. Этот генеративный процесс, получивший название Rapid Prototyping, зародился в конце XX века. Но уже сейчас можно утверждать: современны те отрасли, где применяется Rapid Prototyping.

Идеология ускоренного формообразования изделия (модели, прототипа) базируется на: возможности компьютерного автоматизированного проектирования изделия (по чертежу, аналитическим зависимостям или результатам измерений), компьютерной оптимизации его конструкции, исходя из требований дизайна, формы, функциональных свойств (CAD); трансформации трехкоординатной модели в совокупность послойных двухмерных, двухкоординатных моделей; возможности воспроизвести эту совокупность послойных моделей, т.е. материализовать всю модель как единое целое,

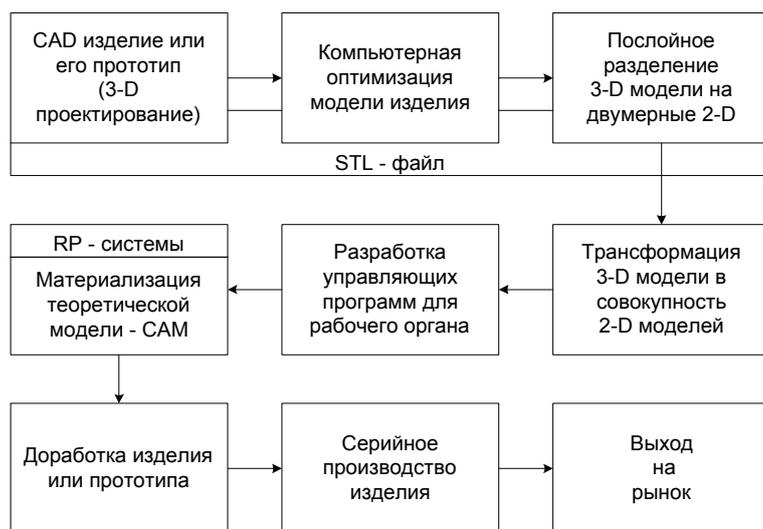


Рис. 1. Структура интегрированного рабочего процесса ускоренного формообразования – Rapid Prototyping.

материализовать всю модель как единое целое,

как твердотельное изделие или его прототип (САМ) – рис. 1.

Функциональная структура интегрированного рабочего процесса ускоренного формообразования изделия может быть представлена в такой последовательности:

1. Получение трехмерной математической модели изделия. Она создается по данным чертежа, частным аналитическим зависимостям. Если изделие воспроизводится, то модель получают на трехкоординатной измерительной машине путем обмера оригинала сканированием поверхности послойно или по точкам – рис. 2 (а).
2. Компьютерная оптимизация конструкции создается по программам, исходя из функционального назначения, дизайна, других требований, предъявляемых к разрабатываемому изделию. Важность этого этапа определяется еще и тем, что

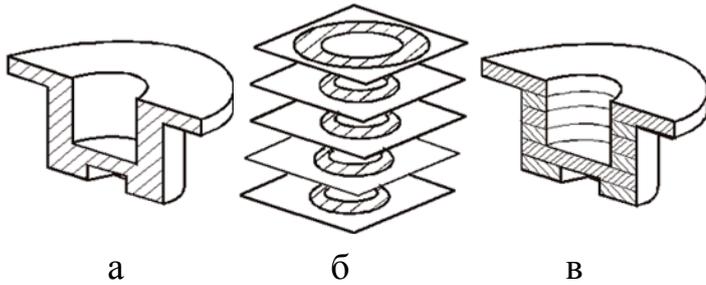


Рис. 2. Основные переходы способа RP: а - 3D-CAD модель; б - совокупность 2D-CAD моделей; в - послойно построенная твердотельная модель.

для компьютерной оптимизации не требуется твердотельная модель или изделие, что резко сокращает время на проектирование.

3. Послойное представление теоретической модели совокупностью двухмерных относительно простых моделей (рис. 2.(б)).
4. Создание программ компьютерного управления движением рабочего органа – «инструмента», с помощью которого послойно в соответствии с совокупностью 2-D моделей будет материализоваться теоретическая модель изделия или его прототипа.
5. Послойное (рис. 2. (в)) получение одним из способов цельной твердотельной модели, изделия или серии изделий.
6. Окончательное изделие или модель получают последующим улучшением свойств. Для этого на первой стадии устанавливаются различия свойств ожидаемого прототипа и требуемого изделия по геометрической форме, физическим, механическим, химическим и другим свойствам.

На второй стадии часть этих различий устраняется за счет параметров процесса материализации теоретической модели.

На третьей, окончательной стадии, происходит «облагораживание» изделия, максимально возможное приближение его функциональных свойств к требуемым: износостойкость, прочность, электропроводность, металлизация, доводка и т. д.

Изложенное позволяет по иному выстроить всю цепочку прототипирования и производства изделия, всецело базируясь на идеологии генеративного послойного изготовления с традиционными подходами показывает, что генеративная технология эффективна на этапах прототипирования и позволяет сократить количество этих этапов.

Но главное достоинство состоит в том, что идея способа генеративного (послойного) изготовления является объединяющей, интегрирующей процессы моделирования, создания инструментального обеспечения и изготовления. Это позволяет представить концептуальную структуру интегрированных технологий, базирующихся на идее генеративного изготовления следующим образом: компьютерное создание концептуальных моделей, генеративное создание функциональных прототипов, генеративное создание инструментального обеспечения, генеративное серийное производство, выход на рынок.

Литература: 1. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні / за ред. А.І. Грабченко. – Харків. ХДПУ. 1999. – 469 с.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОЗДАНИЯ АДАПТИВНЫХ
ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ МЕХАНОПРОИЗВОДСТВА**

Клещёв Г. М. (г. Одесса, Украина)

Described creation intelligent integrated computer system mechanitreat production.

В связи с бурным развитием вычислительной техники появилась возможность в создании надёжно работающих интерактивных, а отсюда и адаптивных интегрированных систем механообрабатывающего производства.

В тоже время возросла тенденция рынка к индивидуализации производимых изделий, которая заставляет многих производителей обращаться к более гибким методам обработки, позволяющим чаще перестраивать производство, затрачивая на это минимум времени. В связи с этим возникла необходимость в технически гибких механизмах и системах управления, позволяющих повысить производительность при мелкосерийном (единичном) производстве, для которых традиционные методы автоматизации непригодны.

Поэтому, с одной стороны, наблюдается усложнение конструкции и математического аппарата, описывающие эти процессы, а с другой стороны, имеется возможность упрощения этого же аппарата для понимания и доступности.

Создание теоретических основ в области автоматизации в виде эквивалентных и математических моделей процессов подготовки производства и изготовления изделий значительно сокращает время трудоёмких процессов, упрощает сложность технических систем массового обслуживания, делает их доступными и обозримыми в реальном масштабе времени. Так, фрагменты описываемой математической модели были реализованы при создании интегрированной (комплексной) системы по проектированию и изготовлению штампов совмещённого действия в отрасли тракторного и сельскохозяйственного машиностроения. Интегрированная система и её подсистемы были не только внедрены на десятках предприятий, но и при помощи их спроектированы и изготовлены в металле более 1000 штампов. Фрагменты описываемой математической модели эффективно использовались в станкоинструментальной отрасли при проектировании многоручьевых, многономенклатурных автоматических линий.

На основании изложенного, предлагается, для промышленности, многоуровневая модель управления гибкой многономенклатурной роторной обработкой деталей. Кинематика роторного механизма состоит из вращающегося грузочного многоуровневого устройства ($A^1_0 \div A^n_0$), вращающихся транспортных (каруселей) устройств ($A_1 \div A_n$), с обрабатываемыми механизмами M , расположенными по горизонтали по длине участка (цеха) и на N уровнях по вертикали. Отсюда многодольная B -сеть, составленная по эквивалентной модели управления гибкой многономенклатурной системы, состоящей из M механизмов по горизонтали и N кадров по вертикали, является пространственной B -сетью.

Настройка и управление такой гибкой многоуровневой и многономенклатурной автоматизированной системой чрезвычайно сложны, но и весьма эффективны, т. к. на относительно небольших по размерам площадях, а стоимость производственных площадей в настоящее время значительно возросла, можно обрабатывать небольшие партии деталей по размерам и большое количество по номенклатуре.

Многодольная B -сеть позволяет управлять и диагностировать любые уровни по

горизонтали и по вертикали. Из многодольных *B-сетей* можно составить как плоскостные по горизонтали и вертикали, так и пространственные системы матриц, например, для учёта количества обрабатываемых деталей в каждой номенклатуре, учёта общего количества деталей, трудоёмкости отработки, станкоёмкости, расчёта энергопотребителей, количества необходимого инструмента, запасных частей спутников и т. п.

По теории профессора Н. П. Соколова о пространственных (объёмных, многомерных) матрицах и порождаемых ими детерминантов высших измерений, некоторая система из n^2 элементов A_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n$), взятая в числовом поле P и расположенная в точках плоскости с декартовыми прямоугольными координатами i, j называется двумерной (квадратной) матрицей n -го порядка на поле P , а любая система из n^3 элементов $A_{i, j, k}$ ($i, j, k = 1, 2, \dots, n$) поля P , расположенная в точках трёхмерного пространства, определяемых координатами i, j, k , называется трёхмерной (кубической) матрицей n -го порядка над P .

Таким образом, в данном случае применена теория пространственных матриц, по которой любая система из n элементов A_{i_1, i_2, \dots, i_p} ($i_1, i_2, \dots, i_p = 1, 2, \dots, n$) поля P , расположенных в точках p -мерного пространства, определяемых координатами i_1, i_2, \dots, i_p , образует p -мерную матрицу n -го порядка над P :

$$A = (A_{i_1, i_2, \dots, i_p}) \quad (i_1, i_2, \dots, i_p = 1, 2, \dots, n). \quad (1)$$

Матрица называется пространственной, если число измерений её p можно предполагать каким угодно числом, большим двух.

Применение в пространственных (объёмных) матрицах многодольных *B-сетей* даёт возможность упрощать математический аппарат, группируя различные значения узловых величин в пространстве методом сечения этого пространства по соответствующим измерениям, приходя к двумерной (квадратной, прямоугольной) матрице n -го порядка на поле P . А в двумерной матрице $A_{i, j}$, имеющей большую размерность, возникает необходимость в декомпозиции, распараллеливании решения линейных уравнений и приведения, в конечном счёте, к виду блочно-диагональной матрицы с окаймлением, что позволяет решать систему уравнений по частям.

Пользуясь двумерными сечениями, можно записать пространственную матрицу в виде квадратной или прямоугольной таблицы. Двумерные сечения при этом отделяются друг от друга вертикальной или горизонтальной чертой. Так, например, кубическая матрица второго порядка с помощью сечений ориентации (i, j) может быть записана в виде прямоугольника:

$$\left| \begin{array}{cc|cc} A_{111} & A_{112} & A_{211} & A_{212} \\ A_{121} & A_{122} & A_{221} & A_{222} \end{array} \right| \begin{array}{l} \xrightarrow{\quad} (i) \\ \downarrow (j) \end{array}, \quad (2)$$

а матрица (1) при $p=4$ и $n=2$ с помощью сечений ориентации (i, j) - в виде квадрата:

$$\left| \begin{array}{cc|cc} A_{1111} & A_{1112} & A_{1211} & A_{1212} \\ A_{1121} & A_{1122} & A_{1221} & A_{1222} \\ \hline A_{2111} & A_{2121} & A_{2211} & A_{2212} \\ A_{2121} & A_{2122} & A_{2221} & A_{2222} \end{array} \right| \begin{array}{l} \xrightarrow{\quad} (i) \\ \downarrow (j) \\ \xrightarrow{\quad} (i) \\ \downarrow (j) \end{array}, \quad (3)$$

где строки указывают направление, в котором возрастают соответствующие индексы.

Приведенная информация по теоретическим разработкам с использованием пространственных матриц и их практическое применение в автоматизации производственных процессов полезна создателям сложных систем как при заполнении, закупорки, наклеивании этикеток на сосуды и проверки их на герметичность, так и при выпечки хлебопродуктов и т.п

Указанные теоретические разработки могут быть применены и в механообрабатывающей промышленности при автоматизации интегрированных производственных процессов. Например, при подготовке производства, а так же при изготовлении изделий, узлов и отдельных деталей. Указанная математическая модель была апробирована в интегрированной системе по проектированию и изготовлению штампов для сельхозпромышленности.

В качестве примера предлагаются разработки по созданию математических моделей для интеллектуальных интегрированных систем автоматизированного проектирования (ИСАПР) и гибких многономенклатурных автоматизированных систем производства (ГАСП) большой сложности, относящихся к техническим системам массового обслуживания (ТСМО).

Концепция разработок основана на укрупнённой математической модели процессов интегрированного проектирования и изготовления изделий ТСМО:

$$A = S^0 \times P \times U \times R \times Z \rightarrow X, \quad (4)$$

где A - вектор интегрированной системы проектирования и изготовления изделий; S^0 - вектор пространства входов, содержащий подпространство: гипотез, идей, научно-технических решений, параметров изделий, деталей и их технические требования; P - вектор процессов проектирования; U - вектор процессов управления проектированием и изготовлением изделий; R - вектора процессов изготовления изделий; Z - вектор связи с внешней средой (изменяющиеся производственные условия); X - вектор пространства выходов соответственно: технической документации, изготавливаемых изделий; \times - знак декартового произведения.

В модели используются методы декомпозиции, деления многодольных B -сетей на отдельные фрагменты распараллеливания, а также применяются элементы теории пространственных матриц, основанные на приведении коэффициентов матриц к блочно-диагональному виду с окаймлением. Указанное позволяет весьма сложные не линейные уравнения, содержащие произведение неизвестных или их степени приводить к линейным уравнениям, т. е. к более простым математическим моделям. Этому процессу способствует разработка эквивалентных моделей или расчётных схем с наложением на них ряда ограничений. В этом случае встаёт вопрос о линеаризации соответствующей задачи, т. е. о приближённом представлении её системой линейных уравнений.

Рассмотрим вектор P (1) процесса проектирования (подготовки производства), в частности проектирования штампов холодной листовой штамповки ($A_i nu$).

Математическая модель с учётом перечисленного будет иметь вид:

$$A_i nu = TKS_i \times OAPS_i \times GAB_i \times PV_i \times AD_i \times KMPM_i \times CYP_i \times OAPSP_i \times Z_i, \quad (5)$$

где $A_i nu$ - вектор процесса проектирования штампов совмещённого действия холодной листовой штамповки; TKS_i - вектор входных параметров (линейных и диаметральных размеров, допусков и чистоты обработки деталей и т. п.); $OAPS_i$ - вектор

решения геометрических задач проектирования, общих для всех базовых и типовых конструкций и векторы библиотеки модулей имеющих самостоятельные расчётные задачи; GAB_i - векторы расчётов и выбора габаритных типоразмеров пакетов и блоков; PV_i - векторы формирования промежуточных массивов; AD_i - векторы адаптации к изменяющимся производственным условиям; $KMPM_i$ - векторы формирования угловых размеров; CYP_i - векторы определения допусков на посадочные размеры; $OAPSP_i$ - векторы формирования выходных документов печати; Z_i - вектор внешних изменяющихся условий производства. Каждый из векторов состоит из определённого количества параметров, логических и расчётных функций, алгоритмов, ограничений и т. п.

Геометрическая модель общего алгоритма проектирования с параллельно-последовательной структурой представлена в докладе на плакате №1. Из модели видно, что работа по параллельно-последовательной структуре значительно (с 3 часов до 15 минут) сокращает время проектирования (расчёты и компоновки) штампов.

Для вектора R - изготовления деталей (1) рассмотрим представленную на плакате №2 (доклада) эквивалентную граф-модель роторного способа производства. Из граф-модели видно, что A_0, A_1, \dots, A_n механизмы карусельного устройства: соответственно загрузочного (A_0) и обрабатывающего ($A_1 \div A_n$) устройств, а $A^1_{1 \div n}$ - обрабатывающее оборудование. Граф-модель в горизонтальной плоскости разделена на много дольную B -сеть ($B_1 \div B_n$) и может использоваться, например, для выделения операций одной детали или при необходимости подсчёта основного и штучно-калькуляционного времени, или для подсчёта количества инструмента и т. п.

Эквивалентная граф-модель роторного способа производства деталей (изделий) исключает вспомогательные системы (транспортные, складские и др.) в виду непрерывности процесса.

Математическая модель указанной граф-модели представлена ниже в виде разряжённой матрицы коэффициентов, приведенной к блочно-диагональному виду с окаймлением.

$$\begin{array}{|c|} \hline x_1^n \\ \hline x_2^n \\ \hline \dots \\ \hline x_n^n \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline A_0^1 \\ \hline A_2^n \\ \hline \dots \\ \hline A_0^n \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline A_1^1 & A_1^2 & \dots & A_1^n \\ \hline A_2^1 & A_2^2 & \dots & A_2^n \\ \hline \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hline A_n^1 & A_n^2 & \dots & A_n^n \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline A^1_{01} \\ \hline A^1_{02} \\ \hline \dots \\ \hline A^n_{0n} \\ \hline \end{array}, \quad (6)$$

где $x_1^n \div x_n^n$ - векторы выходной информации (в данном случае сведения об изготовленных деталях и их параметры); $A_0^1 \div A_0^n$ - векторы входной информации об изготавливаемых деталях (заготовках); $A_1^1 \div A_n^n$ - векторы информации об оборудовании, диагностика о текущем состоянии детали в процессе обработки и т. п.

Создание теоретических основ в области автоматизации в виде эквивалентных и математических моделей процессов подготовки производства и изготовления изделий значительно сокращает время трудоёмких процессов, упрощает сложность технических систем массового обслуживания, делает их доступными и обозримыми в реальном масштабе времени. Так, фрагменты описываемой математической моде-

ли были реализованы при создании интегрированной (комплексной) системы по проектированию и изготовлению штампов совмещённого действия в отрасли тракторного и сельскохозяйственного машиностроения (в дальнейшем и автомобилестроения). Интегрированная система и её подсистемы были не только внедрены на десятках предприятий, но и при помощи их спроектированы и изготовлены в металле более 1000 штампов. Фрагменты описываемой математической модели эффективно использовались в станкоинструментальной отрасли при проектировании многоручьевых, многономенклатурных автоматических линий.

Указанная информация по теоретическим разработкам в автоматизации производственных процессов полезна создателям интегрированных систем и систем массового обслуживания.

Литература: 1. Ядыкин И. В. и др. Адаптивное управление непрерывными технологическими процессами. – М.: Энергоатомиздат, 1985 2. Клещёв Г. М. и др. Проблемы внедрения технологий будущего- интегрированных адаптивных систем в среде рыночной экономики. Киев. Ресурсо- и энергосберегающие технологии в машиностроении. Материалы конференции. 5-7 сентября 1995. 3. Моргун Б.А., Клещёв Г.М., Тихенко В.Н. Интегрированные системы подготовки производства и гибкого многономенклатурного изготовления изделий. Международная научно- методическая конференция “Автоматизация проектирования и производства изделий в машиностроении” Сумы, 1995. 4. Клещёв Г. М. Адаптивная система автоматизированного проектирования штампов.- М.: Экспресс- информация. Технология тракторного и сельскохозяйственного машиностроения, 1982.

УДК 330.105.03

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТОК-ЧАСТОТА И ЦИФРОВЫХ БЛОКОВ

Клещёв Г. М., Балтовский А. А., Кухаренко С.В. (г. Одесса, Украина)

At the article algorithms are representative models of analogy model currant-frequent and of digital models it's blocks.

Введение. Цифровая обработка сигналов стала наиболее распространенным видом преобразования аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые (ЦАП) преобразователей. Аналого-цифровые преобразователи представляют собой устройства, выполняющие преобразование значений аналоговых сигналов, в соответствующие значения сигналов в дискретной форме. ЦАП выполняют обратную функцию.

Развитию и применению указанных преобразователей посвящены работы учёных Украины и СССР, хотя до распада СССР, сведения по их применению публиковались редко.

Существующие в настоящее время АЦП можно классифицировать [1] по принципу работы: преобразователи поразрядного уравнивания; параллельные преобразователи; преобразователи с предварительным преобразованием измеряемой функции в частоту или интервал времени.

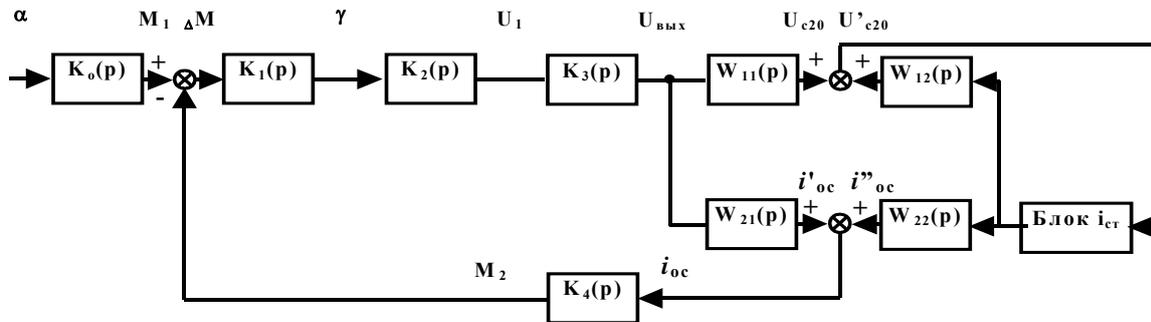
Наряду с АЦП и ЦАП в различных устройствах используются преобразователи напряжение – частота и ток-частота, которые нашли широкое применение.

Использование в качестве измерительных датчиков компенсационных систем с большим петлевым коэффициентом усиления предполагает повышение требования к методу измерения сигнала обратной связи, точность которого должна быть не менее статизма системы [2]. Таким методом является метод аналого-цифрового преобразования, причем при невысоких требованиях к быстрдействию аналого-

цифровых преобразователей можно использовать преобразователи интегрирующего типа, в силу присущих им большой точности и линейности преобразования, а также повышенной помехоустойчивости по сравнению с другими методами преобразования. Поэтому возникает необходимость в разработке методики моделирования, самого моделирования и исследования АЦП интегрирующего типа.

Основная часть. В АЦП информация о величине входного сигнала снимается с интегрирующего конденсатора, а функционирование датчика обеспечивается за счет периодического (при постоянной величине входного сигнала) разряда конденсатора эталонными импульсами тока, которые вносят возмущения в работу измерительной системы. Сложный характер совместного воздействия входного сигнала и эталонных импульсов преобразователя на измерительную систему требует моделирования системы уравнений, описывающих датчик и АЦП, с целью изучения динамических ошибок (определяемых в основном динамикой измерительной системы) и возможной неустойчивости работы при различных входных сигналах и, следовательно, различной частоте следования эталонных импульсов тока.

Блок-схема преобразователя ток-частота интегрирующего типа приведена на рисунке.



Анализ блоков преобразователя позволил получить следующее операторные соотношения [3] между переменными:

$$\begin{aligned}
 K_0(p) &= K_0 = M_1 / \alpha = 2,04 \cdot 10^{-3} \text{ гсек}^2; \\
 K_1(p) &= \gamma(p) / \Delta M(p) = 1 / j(p^2 + 2Hp + \Omega_0^2); \\
 j &= 11,45 \cdot 10^{-3} \text{ г} \cdot \text{см} \cdot \text{сек}^2; 2H = 99 \text{ сек}^{-1}; \\
 \Omega_0^2 &= 1,8 \text{ сек}^{-2}, \\
 K_2(p) \cdot K_3(p) &= U_1 \cdot U_{\text{вых}} / \gamma \cdot U_1 = U_{\text{вых}} / \gamma = 1000 \text{ в} \cdot \text{рад}^{-1}; \\
 \begin{bmatrix} U_{C20}(p) \\ i_{OC}(p) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} W_{11}(p) & W_{12}(p) \\ W_{21}(p) & W_{22}(p) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{\text{вых}}(p) \\ i_{cm}(p) \end{bmatrix}; \\
 W_{11}(p) &= 1 / (7,7 \cdot 10^{-6} p^2 + 112 \cdot 10^{-3} p + 1); \\
 W_{12}(p) &= (0,77 p + 11200) / (7,7 \cdot 10^{-6} p^2 + 112 \cdot 10^{-3} p + 1); \\
 W_{21}(p) &= 10 \cdot 10^{-6} p / (7,7 \cdot 10^{-6} p^2 + 112 \cdot 10^{-3} p + 1); \\
 W_{22}(p) &= 1 / (7,7 \cdot 10^{-6} p^2 + 112 \cdot 10^{-3} p + 1); \\
 K_4(p) &= M_2(p) / i_{OC}(p) = 4,15 \cdot 10^3 \text{ гсма}^{-1}; \\
 \Delta M &= M_1 - M_2; \\
 i_{cm} &= I_{cm} [1(t_i) - 1(t_i + T_{эм})];
 \end{aligned}$$

$$t_i = t \cdot \text{zer}(U_{C20} - U_{оп});$$

$$\text{zer}(x - y) = \text{sg}(x - y)\text{sg}(y - x).$$

Система уравнений моделировалась на АВМ типа МН-14. Логическая часть системы моделировалась на операционных реле. Выходные сигналы записывались с помощью электронного потенциала типа ЭПП-09. Получены временные диаграммы изменения напряжения на измерительном конденсаторе, изменения угла поворота подвижной системы датчика и изменения суммарного момента датчика при различных величинах входного сигнала, а также переходные процессы в системе датчик-АЦП при ступенчатом входном сигнале.

Основные результаты моделирования:

1. Переходные процессы в преобразователе ток-частота при ступенчатом входном сигнале длятся от 0,75 до 1,3 сек.

2. Передаточную функцию преобразователя можно представить в виде:

$$W_n(p) = f(p)/\alpha(p) = e^{-p\tau} / (T_p + 1),$$

$$\tau = f(U_{C20}, \Delta U_{ex}); T \approx 0,3 \text{сек}.$$

3. Преобразователь устойчив во всем диапазоне изменения входного сигнала. Линейность преобразователя оценивается до третьего знака после запятой

$$f/\alpha = 0,097 \pm \delta; \quad \delta < 0,001.$$

Анализ точностных характеристик интегрирующего преобразователя ток-частота с учетом технологического разброса параметров пассивных и активных элементов предполагает предварительный статический и динамический анализ функциональных блоков с учетом их взаимного влияния. Методы получения и анализа математических моделей блоков на ЦВМ варьируются в зависимости от режима работы, влияния нелинейности, возможности отдельного исследования статического и динамического режимов.

Одним из важнейших вопросов, возникающих при разработке цифровых моделей электронных блоков, является выбор эквивалентной схемы активных и нелинейных элементов и получение параметров математических описаний. При анализе преобразователя ток-частота приняты следующие исходные зависимости:

1. Математическое описывание полупроводникового диода и стабилитрона при малом сигнале для статического режима задается уравнением:

$$i_3 = (U_3 - E_o) / R_3; \quad R_3 = \left. \frac{dU_3}{di_3} \right|_{U_3};$$

$$E_o = U_3 - i_3 \text{ctg} \alpha;$$

для динамического режима:

$$i_3 = (U_3 - E_o) / R_3 + C_3 \frac{dU_3}{dt};$$

$$C_3 = C_\delta + C_{\text{диф}},$$

где C_δ - барьерная емкость $p-n$ перехода; $C_{\text{диф}}$ - диффузная емкость.

2. Математическое описание эквивалентной схемы полупроводникового диода при большом сигнале для статического режима:

$$i_3 = I_s \left(e^{U_3 / m\varphi_T} - 1 \right) + yU_3,$$

где I_s - ток насыщения перехода; φ_T - температурный потенциал; m - коэффициент,

учитывающий поверхностное сопротивление диода.

В динамическом режиме диод описывается выражением:

$$i_{\vartheta} = I_s \left(e^{U_{\vartheta} / m\varphi_T} - 1 \right) + yU_{\vartheta} + C_{\vartheta} dU_{\vartheta} / dt.$$

3. Транзистор при малых сигналах описывается комплексными параметрами.

При анализе некоторых схем использовалась физическая Т-образная схема замещения с учетом емкости коллекторного перехода.

4. При больших сигналах транзисторы описываются известной моделью Эберса-Молла [4].

Параметры аппроксимирующих выражений, вычислялись методом наименьших квадратов по экспериментально полученным характеристикам; технологический разброс учитывался приращениями параметров.

Составление уравнений схем в линейном режиме производилось обобщенными методами узловых потенциалов или контурных токов; первый метод предпочтительнее. Анализ статического режима производился методом обобщения матрицы схемы и вычислением коэффициентов влияния, определяемых как частные производные выходной величины по соответствующим параметрам, или методом наихудшего случая. Динамические режимы рассчитывались на основании аналитического выражения для переходной функции или методом Рунге-Кутты с автоматическим выбором шага интегрирования. Схема регенеративного типа анализировалась на устойчивость в малой окрестности бифуркационной точки; условие регенерации получалось из анализа матрицы линеаризованной схемы.

В соответствии с изложенной методикой проанализированы стабилизатор тока, электронный ключ, диодно-регенеративный компаратор, аналоговый датчик преобразователя ток-частота.

Выводы. 1. Разработанные модели могут быть использованы при разработке новых АЦП интегрирующего типа. 2. С целью более точного задания эталонных импульсов тока и автоматической обработки результатов целесообразно проводить моделирование преобразователя ток-частота на гибридной машине.

Литература: 1. Горошков Б.И. Элементы радиоэлектронных устройств: Справочник. –М.: Радио и связь, 1988.–176 с. 2. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно измерительных систем. –М.: Машиностроение, 1980. –280 с. 3. Кокоско В.С. Вычислительная техника в машиностроении. –Свердловск: Знание, 1971. – 90 с. 4. Калахан Д. Методы машинного расчета электронных схем -М.: Мир, 1970. –С.32-37.

УДК 621. 9.06-82

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДАВЛЕНИЯ В ГИДРОПРИВОДЕ СТОЛА ПЛОСКОШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ ОТ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ

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

The features of work of hydrodrives of longitudinal submission of a table surface grinding machine are considered. On the basis of results of experimental researches of dependences of pressure from speed of movement of a table the data for a choice of optimum parameters of a hydrodrive are received.

Энергетические показатели гидросистем шлифовальных станков зависят от способов регулирования скорости исполнительных гидродвигателей и согласования давления и расхода источника гидравлической энергии с рабочими давлениями и

потребляемыми расходами гидродвигателей [1]. Основными потребителями энергии в шлифовальных станках с возвратно–поступательным перемещением стола являются гидроприводы продольной подачи стола.

Поскольку силы резания в шлифовальных станках невелики, основными нагрузками для гидропривода продольной подачи являются силы трения в направляющих стола и уплотнениях гидроцилиндра на рабочем ходу, а в процессе реверса стола – силы инерции стола и трения. Так как при работе в зоне жидкостного трения с увеличением скорости стола силы трения возрастают и, кроме того, из–за увеличения потока жидкости повышаются потери давления в трубопроводах и аппаратах гидросистемы, давление источника гидравлической энергии на рабочих ходах возрастает по мере роста скоростей стола. В шлифовальных станках с тяжелым столом и высокими скоростями движения (плоско– и продольношлифовальные станки) силы инерции стола при реверсах по своему уровню значительно превосходят силы трения. В связи с этим максимальное давление насоса выбирается исходя из условия разгона стола до наибольшего значения скорости с максимально возможным ускорением, не вызывающим ударов при реверсе. Поэтому в этих станках максимальное давление насоса при реверсах значительно превосходит рабочее давление при установившейся скорости движения на рабочих ходах стола. Для получения высокого качества обрабатываемой поверхности необходимо, чтобы во время контакта детали с кругом скорость движения стола оставалась постоянной, а разгон и торможение происходили после выхода детали из зоны резания, т. е. на выбеге стола.

Таким образом, специфической особенностью гидроприводов шлифовальных станков с продольной подачей стола является сильно выраженная зависимость необходимого давления и потребляемой мощности от скорости перемещения стола на рабочих ходах и возрастание давления и мощности при реверсах стола.

В качестве исходной нагрузочной характеристики привода стола при оценке энергетических показателей различных вариантов гидропривода могут быть использованы графики давления нагрузки и потерь давления в гидроприводе в зависимости от установившейся скорости стола (рис. 1), полученные на основе испытаний плоскошлифовальных станков моделей 3Д722 и 3Е722 (при весе стола с изделием 140 Н).

Давление нагрузки определяется разностью (перепадом) давлений в полостях гидроцилиндра стола $\Delta p_{гц}$, необходимой для преодоления сил трения. В областях малых

скоростей стола (до 5 м/мин) имеет место падающая характеристика силы трения, характерная для смешанного трения, поэтому с уменьшением скорости ниже 5 м/мин необходимый для движения стола перепад давлений в цилиндре резко возрастает. В момент начала движения стола с места после остановки давление может достигать 2,8 МПа.

При увеличении скорости стола свыше критической ($V = 5$ м/мин) имеет место гидродинамическое трение, при этом сила трения плавно возрастает от 9 Н до 17,5 Н, а перепад давлений от 0,4 до 0,7 МПа. Общие потери давления в гидросистеме стола определяются суммой отдельных видов потерь

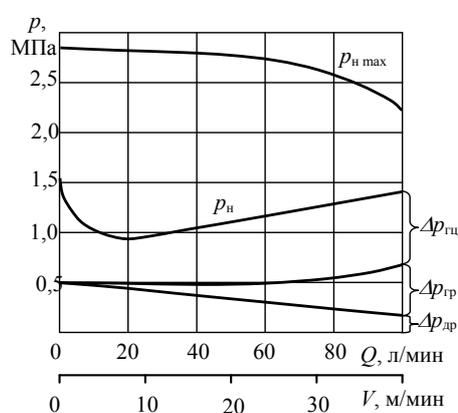


Рис 1. Зависимость давлений в гидроприводе продольной подачи стола от скорости движения.

$$\Delta p = \Delta p_{зц} + \Delta p_{др} + \Delta p_{тр} + \Delta p_{ан},$$

где $\Delta p_{др}$ – перепад давлений на дросселе; $\Delta p_{тр}$ – потери давления в трубопроводах; $\Delta p_{ан}$ – потери давления в аппаратах.

Перепад давления на дросселе $\Delta p_{др}$ устанавливается в зависимости от требуемого уровня противодействия для обеспечения устойчивости движения стола в области малых скоростей и должен снижаться по мере роста скорости с целью уменьшения энергетических потерь. В соответствии с этим на представленном графике $\Delta p_{др}$ изменяется от 0,4 до 0,2 МПа при увеличении скорости стола от 0 до 45 м/мин. Потери давления в трубопроводах $\Delta p_{тр}$ практически линейно повышаются с ростом скорости, достигая 0,4 МПа при максимальной скорости 45 м/мин. Потери давления в аппаратах $\Delta p_{ан}$ нелинейно зависят от протекающего через них расхода жидкости Q и достигают 0,6 МПа при максимальной скорости стола.

В гидросистемах с дроссельным и объемно–дроссельным регулированием скорости при постоянном давлении необходимый уровень давления, настраиваемый клапаном или регулятором давления насоса, должен устанавливаться в соответствии с верхней кривой $p_{нmax}$ на рис. 1 в пределах 2,5–3,0 МПа из условия обеспечения разгона стола до максимальной скорости 45 м/мин за время $t_p = 0,25–0,3$ с (средняя величина ускорения – 3 м/с²). Изменения давления $p_{нmax}$ с ростом скорости определяются статизмом клапана (регулятора) [2,3].

В случае применения гидросистемы с реверсивным регулируемым насосом необходимое давление насоса на рабочем ходу стола при возрастании скорости от 3 до 5 м/мин изменяется в пределах $p_{нрх} = \Delta p_{зц} + \Delta p_{тр} = 0,5 \div 1,2$ МПа, а максимальное давление при разгоне стола может достигать 2,5–3 МПа при скорости 45 м/мин и снижаться до 1,5–2 МПа в зоне малых скоростей стола.

На основе результатов экспериментальных исследований зависимостей давления от скорости движения стола были получены данные для выбора оптимальных параметров гидропривода, которые использовались при разработке гидроприводов плоско- и профилишлифовальных станков [4]. Это позволило повысить улучшить энергетические характеристики приводов, снизить тепловыделения в станке, повысить качество обработки.

Литература: 1. Тихенко В. Н. Использование дополнительных обратных связей для повышения эффективности гидравлических приводов // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2000. — Вып. 3 — С. 20 — 24. 2. Тихенко В. Н. Исследование станочных гидроприводов с насосами, управляемыми по перепаду давления на дросселе скорости рабочего органа // Вестн. Нац. техн. ун-та Украины „КПИ” — 1999. — Вып. 35 — С. 42 — 46. 3. Тихенко В.М. До розрахунку параметрів механізму керування регульованих пластинчатих насосів гідроприводів плоскошліфовальних верстатів // Вісн. Черкас. інженер.-технол. ін-ту. — Черкаси, 1998. — С. 92 — 95. 4. Тихенко В.Н., Менакер П.С. Разработка и исследование гидропривода профилишлифовального станка // Вісник Сумського держ. ун-та. – Суми, 2004, №13 — С. 10 — 14.

УДК 621.9, 62-82

О ВИРТУАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ НОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Рябчук В.Э., Тихенко В.Н., канд. техн. наук (г. Одесса, Украина)

Inside the given scheme of development of new machinery a mathematical model of determination of the external load was proposed.

При проектировании нового оборудования в условиях современного производства, когда номенклатура производимой на этом оборудовании продукции стреми-

тельно возрастает, а ее жизненный цикл сокращается, необходим особый подход. Такой подход заключается в создании широкоуниверсального, агрегатно-модульного, легко перенастраиваемого оборудования, которое на данном этапе способно выполнять требуемые операции обработки, а при необходимости, может быть перенастроено для выполнения новых. Широкая универсальность оборудования, спроектированного по предложенному принципу, обладает тем преимуществом, что в условиях повсеместного роста среднего и малого бизнеса такое оборудование будет наиболее востребованным, в отличие от широкой гаммы специальных и специализированных станков, станочных линий и комплексов. Агрегатно-модульный принцип компоновки предполагает быстрый переход от одной номенклатуры выпускаемых изделий к другой (зачастую, в условиях традиционного производства абсолютно несовместимых на одном и том же виде оборудования). Быстрая перенастраиваемость оборудования также необходима не только для перехода от одной номенклатуры выпускаемых изделий к другой, но в большей степени к переходу от обработки одного изделия к другому внутри заданной номенклатуры. К понятию перенастраиваемости относится и обеспечение точности и качества выпускаемой на данном оборудовании продукции.

С учетом данных выше принципов проектирования нового оборудования авторами изучается перенастраиваемость модулей станков, обеспечивающих движение подач. Перенастраиваемость следует рассматривать и как оптимизацию процесса обработки с целью повышения качества продукции. На современном этапе развития промышленности и компьютерных технологий оптимизация без виртуального моделирования невозможна, так как времени на построение и испытание реальных моделей катастрофически недостаточно из-за конкуренции среди производителей. В таких условиях бурный рост приняло такое явление как виртуальная инженерия (CAE) – имитационный метод, помогающий инженерам в принятии решений и управлении [1]. Процесс проектирования в условиях виртуальной инженерии состоит в том, что заранее известная или вновь спроектированная модель какого-либо модуля оборудования моделируется в виртуальном пространстве со своими основными рабочими характеристиками и подвергается влиянию факторов, имитирующих интересующие внешние воздействия на оборудование. Таким образом, перед авторами стоит задача с одной стороны моделирования непосредственно модуля привода подач, а с другой моделирования внешних воздействий на этот модуль.

В тех случаях, когда технологическое оборудование должно быть широкоуниверсальным, нагрузка на привод подачи изменяется в большом диапазоне, но при этом требуется обеспечивать высокую точность обработки предпочтение отдается гидравлическому приводу. К основным преимуществам гидропривода относятся: возможность универсального преобразования механической характеристики приводного двигателя в соответствии с требованиями нагрузки; легкость управления и автоматизации; простота предохранения приводного двигателя и исполнительных органов машин от перегрузок; широкий диапазон бесступенчатого регулирования скорости выходного звена; большая передаваемая мощность на единицу массы привода; надежная смазка трущихся поверхностей при применении минеральных масел в качестве рабочих жидкостей.

Основным внешним воздействием на модуль привода подач можно считать внешнюю нагрузку, в частности, от сил резания. Существуют эмпирические зависимости [2], которые учитывают влияние режимов резания на величину внешней

нагрузки при помощи различных справочных коэффициентов и табличных данных. Однако такой подход существенно ограничивает область моделирования, а именно сводит эти границы к границам базы данных по проведенным экспериментам. Для моделирования процесса резания в условиях виртуальной инженерии необходима математическая модель процесса. Резание является многокритериальным процессом, поэтому математическое моделирование сильно затруднено. В технических расчетах и на производстве при оценке внешней нагрузки применяют эмпирические зависимости [1], которые в основном отражают влияние только нескольких основных критериев на величину нагрузки, называемых режимами резания. Авторами было предложено разработать математическую модель резания, которая учитывает влияние режимов резания на величину внешней нагрузки, и в тоже время не зависит от базы данных по экспериментам, а непосредственно оперирует физико-механическими и геометрическими параметрами обрабатываемой заготовки и инструмента.

В основе предлагаемой модели лежит предположение об упруго-пластическом контакте инструмента с заготовкой. Теория упруго-пластических деформаций широко известна и обладает хорошо разработанным математическим аппаратом. При определении силы процесс резания рассматривается как контакт заготовки, стружки и инструмента как упруго-пластических тел в условиях так называемого ортогонального резания [3]. Сила резания непосредственно определяется путем интегрирования эпюр распределения контактных напряжений по длине контакта заготовки с инструментом. Процесс ортогонального резания на практике практически не встречается, поэтому в модели сделаны соответствующие корректировки. Авторами рассмотрено допущение, что при любом процессе резания, будь то точение или фрезерование, всегда можно отыскать такую плоскость, в которой происходит процесс ортогонального резания. Таким образом, определение силы резания, действующей на инструмент, будет сводиться к отысканию положения всех таких плоскостей на длине контакта режущих кромок инструмента с заготовкой и интегрирования распределений контактных нагрузок, действующих между инструментом и заготовкой, в каждой такой плоскости.

На первом этапе исследований авторами была составлена математическая модель процесса резания, когда направление подачи перпендикулярно оси заготовки

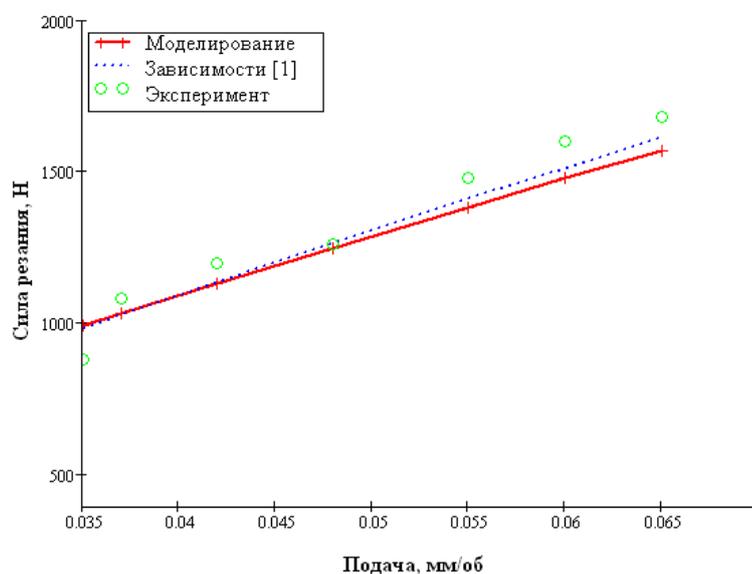


Рис.1. Результаты моделирования.

(отрезка). Схема такого процесса наиболее близка к ортогональному резанию. Плоскости, в которых происходит процесс ортогонального резания (при условии, что главный угол в плане отрезного резца составляет 90°) совпадают с главной секущей плоскостью инструмента и в каждой точке контакта режущей кромки инструмента ориентированны одинаково. Проведенные эксперименты по измерению силы резания при отрезке показали результаты близкие полученным

при математическом моделировании, а также близкие к рассчитанным по известным эмпирическим зависимостям [2].

Дальнейшее усовершенствование математической модели позволит эмитировать и более сложные процессы резания, а, следовательно, и воспроизводить виртуальные внешние условия при работе модуля подачи. Одной из поставленных авторами задач является моделирование поведения гидравлического привода подачи при фрезеровании, которое характеризуется неравномерными динамическими внешними нагрузками. На процессы фрезерования в условиях современного производства приходится почти половина всех технологических операций, следовательно, виртуальное проектирование модулей подачи для такого вида оборудования является актуальной задачей. Виртуальное проектирование модулей подачи призвано повысить точность и качество обработки на станках нового типа, что является первостепенной задачей любого производства.

Литература: 1. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). – СПб: Питер, 2004. - 560 с. 2. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 /Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. - 5-е изд. - М: Машиностроение, 2001. - 944 с. 3. Toropov A., Ko S.L. Determination of stress state in chip formation zone by central slip-line field// International Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 4, №3, 2003. p. 66-70.

УДК 621.92

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЁТОВ КРУГЛОШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ

Серховец О.И., канд. техн. наук, проф., (г. Харьков, Украина)

The initial data for dynamic calculations of circular grinder drives. O.I. Serkhovets. In article the method of definition of the initial data necessary for dynamic calculations is offered in circular grinder drives.

Вопросы работы круглошлифовальных станков и в том числе с адаптивным управлением рассматривались такими авторами, как Михелькевич В.Н., Якимов А.В., Ларшин В.П., Бурек Ян и др. Ими были показаны преимущества этих станков, главными из которых являются повышение производительности и обеспечение необходимого качества обработки. Вместе с тем, следует отметить недостаточность данных, необходимых для динамических расчётов подобных станков.

Целью данной работы является восполнение недостающих исходных данных необходимых при динамических расчётах и моделировании проектируемого оборудования.

Исследования форм колебаний круглошлифовальных станков показывают, что определяющими с точки зрения их влияния на точность обработки являются колебания элементов станков в направлении нормали к обрабатываемой поверхности. Это даёт возможность рассматривать упругую систему станка как плоскую, а не пространственную, что упрощает её анализ. В соответствии с принятыми допущениями, на рис.1 предложен вариант динамической системы круглошлифовального станка с адаптивным управлением модели 3М152ВФ20.

Здесь: m_1, m_2, m_3 – приведенные массы детали, шлифовального круга со шпиндельной группой и шлифовальной бабки с установленными на ней агрегатами соответственно; c_1 – жёсткость технологической подсистемы «деталь в центрах», учитывающая жёсткости передней и задней бабок, рассмотрена нами в [5].

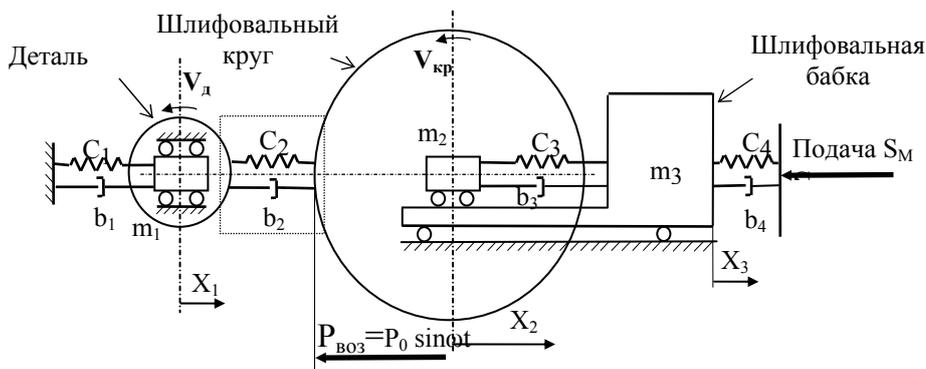


Рис.1. Динамическая модель круглошлифовального станка.

в перечисленных элементах; $P_{воз} = P_0 \cdot \sin \omega t$ – гармоническая возмущающая сила, вызванная неуравновешенностью шлифовального круга. Здесь P_0 – амплитуда переменной составляющей силы резания P_y ; ω – круговая частота вынужденных колебаний, t – время; X_1, X_2, X_3 – координаты перемещений детали, круга и шлифовальной бабки соответственно.

Шпиндельный узел круглошлифовальных станков мод. 3М152ВФ20 имеет ряд отличий от обычных шлифовальных станков с ЧПУ. В качестве передней опоры применен гидростатический подшипник, позволяющий при нагружении за счёт перепада давления в карманах измерять составляющую силы P_y .

Рассмотрим более подробно подсистему закрепления детали в центрах изображённую на рис.2.

Здесь $c'_{ц}, c'_{ш}$ – жёсткости центра совместно со стыком в отверстии шпинделя с конусом Морзе 5 и гидростатического подшипника шпинделя передней бабки соответственно; $c''_{ц}, c''_{п}$ – жёсткости центра со стыком в отверстии пиноли с конусом Морзе 4 и пиноли со стыком в корпусе задней бабки соответственно; $b'_{ц}, b'_{ш}$ – коэффициенты демпфирования в стыках центра передней бабки – шпиндель и гидростатического подшипника передней бабки соответственно; $b''_{ц}, b''_{п}$ – коэффициенты демпфирования в стыках центра задней бабки – пиноль и пиноль – корпус задней бабки соответственно. Здесь учитывается демпфирование только в стыках и в гидростатическом подшипнике, так как они более, чем на порядок выше демпфирования сплошного металла. c'''_1, b'''_1 – жёсткость и коэффициент демпфирования обрабатываемой детали.

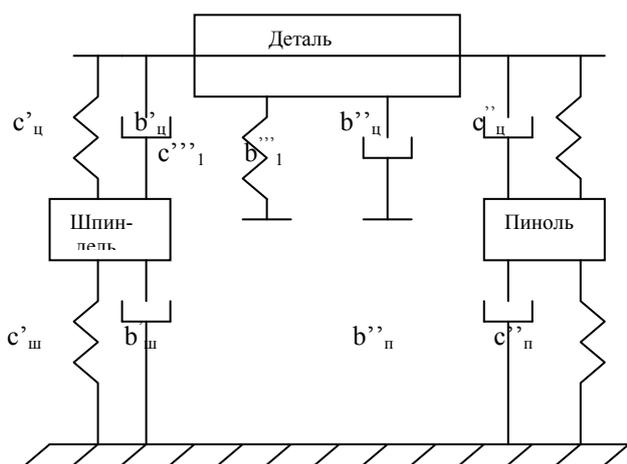


Рис.2. Подсистема закрепления детали.

обрабатываемой детали.

При последовательном соединении упругих элементов, которые имеют место для передней бабки, её приведенную жёсткость можно определить зависимостью [1, 6]:

$$c'_1 = c'_{ц} \cdot c'_{ш} / (c'_{ц} + c'_{ш}) = 0,58 \cdot 10^8 \cdot 6,25 \cdot 10^8 / (0,58 \cdot 10^8 + 6,25 \cdot 10^8) = 0,53 \cdot 10^8 \text{ Н/м.} \quad (1)$$

Здесь, $c'_{\text{ш}}$ – суммарная жёсткость консольно-защемлённого центра со стыком центр – шпиндель передней бабки.

Жёсткость гидростатического подшипника шпинделя передней бабки можно определить по формуле предложенной в литературе [2].

$$c'_{\text{ш}} = 1,5 \cdot D^2 \cdot p_{\text{н}} / \Delta \quad (\text{кГс/мм}), \quad (2)$$

где D – диаметр подшипника (мм), $p_{\text{н}}$ – давление насоса (кГс/мм²), Δ – диаметральный зазор (мм). Для нашего случая: $D = 100$ мм; $p_{\text{н}} = 2,5$ МПа $\approx 0,25$ кГс/мм². $c'_{\text{ш}} = 1,5 \cdot 100^2 \cdot 0,25 / 0,06 = 6,25 \cdot 10^8$ н/м.

Аналогично рассчитывается приведенная жёсткость задней бабки с учётом того, что здесь контакт пиноли с корпусом задней бабки осуществляется с помощью шариков качения, расположенных в гильзе сепаратора и они вставлены в отверстие бабки с натягом

$$c''_1 = c''_{\text{ш}} \cdot c''_{\text{н}} / (c''_{\text{ш}} + c''_{\text{н}}) = 0,39 \cdot 10^8 \cdot 1,24 \cdot 10^8 / (0,39 \cdot 10^8 + 1,24 \cdot 10^8) = 0,29 \cdot 10^8 \text{ н/м}. \quad (3)$$

Для определения деформации детали, установленной на жёстких опорах, воспользуемся зависимостью предложенной [7]:

$$e_i = P_i \cdot z_i^2 \cdot (z_{\text{max}} - z_{\text{min}} - z_i)^2 / [3EI_{\text{np}} \cdot (z_{\text{max}} - z_{\text{min}})], \quad (4)$$

где P_i – составляющая силы резания P_y , приложенная в i -том сечении детали; z_i – значение текущей координаты; z_{max} , z_{min} – координаты торцов заготовки; E – модуль упругости, I_{np} – приведенный момент инерции сечения заготовки

$$I_{\text{np}} = \sum_{i=1}^{\pi} l_i \cdot I_i / \sum_{i=1}^{\pi} l_i, \quad (5)$$

где l_i и I_i – длины и моменты инерции рассматриваемых ступеней заготовки; n – количество ступеней.

Приведенная жёсткость подсистемы «передняя бабка – обрабатываемая деталь – задняя бабка» определяется зависимостью:

$$c_1 = c''_1 \cdot (c'_1 + c''_1) / (c'_1 + c''_1 + c''_1). \quad (6)$$

После подстановки рассчитанных данных она составит – $0,55 \cdot 10^8$ н/м.

Приведенный или эквивалентный коэффициент демпфирования для передней бабки может быть определён по следующей зависимости [1, 6]:

$$b'_1 = b'_{\text{ш}} \cdot (c'_1 / c'_{\text{ш}})^2 + b'_{\text{ш}} \cdot (c'_1 / c'_{\text{ш}})^2, \quad (7)$$

где $b'_{\text{ш}}$ и $b'_{\text{ш}}$ – коэффициенты демпфирования гидростатического подшипника шпинделя и стыка центра и отверстия в шпинделе соответственно.

Аналогично рассчитывается коэффициент демпфирования для задней бабки. $T_{b,n}$ пиноли качения принята $4,1 \cdot 10^{-6}$ с

Приведенный коэффициент демпфирования подсистемы «передняя бабка-деталь-задняя бабка» может быть определён по зависимости, предлагаемой [1, 6]:

$$b_1 = (b'_1 + b''_1) \cdot [c''_1 / (c'_1 + c''_1 + c''_1)]^2 + b''_1 \cdot [(c'_1 + c''_1) / (c'_1 + c''_1 + c''_1)]^2. \quad (8)$$

После подстановки значений получим

$$b_1 = 0,86 \cdot 10^4 \text{ н} \cdot \text{с/м}.$$

Величина обратная приведенной жёсткости гидростатического подшипника шпинделя шлифовального круга с учётом жёсткости опоры, может быть определена следующим образом:

$$1/c_3 = 1/c_n + 1/c_o,$$

где c_n , c_o – жёсткость слоя смазки гидростатического подшипника и опоры соответ-

ственно.

Расчёты дали величину $c_3=5,14 \cdot 10^8$ н/м.

Коэффициент демпфирования в гидростатическом подшипнике с учётом приведенной его жёсткости:

$$b_3=T_{b,n} \cdot c_3=7,5 \cdot 10^5 \cdot 5,14 \cdot 10^8=3,85 \cdot 10^4 \text{ н} \cdot \text{с/м},$$

где $T_{b,n}$ – постоянная времени гидростатического подшипника [1].

Жёсткость стыка между кругом и обрабатываемой деталью предлагается определять зависимостью

$$c_2=V_u \cdot B/K_p, \quad (9)$$

где B - ширина обработки(мм), V_u - скорость вращения изделия (м/мин), K_p - коэффициент режущей способности круга (мм³/мин · н).

Эти расчётные данные близки к полученным экспериментальным путём с помощью тензометрических измерений для таких же кругов [3].

Для нашего случая коэффициент демпфирования зоны контакта может быть определён зависимостью: $b_2=T_{b,2} \cdot c_2=1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^8=1,2 \cdot 10^5$ н · с/м

Определим приведенную жёсткость механизма поперечных подач и демпфирование в механизме перемещений шлифовальной бабки. Механизм подач включает

ряд последовательно соединённых элементов, поэтому $c_4=1/\sum_{i=1}^n 1/C_i$, где n - количество

последовательно соединённых элементов привода, c_i - жёсткость каждого элемента. Такими элементами, например, являются упорный подшипник, передача винт- гайка качения, винт и т. д. В нашем случае рассчитывалась жёсткость каждого элемента и затем определялась приведенная жёсткость c_4 . Для станка 3М152ВФ20 она составляет $5,9 \cdot 10^8$ н/м.

Учитывая параллельное демпфирование направляющих бабки и механизма подач, $b_4=b_4'+b_4''$, где b_4' и b_4'' -коэффициенты демпфирования в направляющих и в механизме подач соответственно. b_4' определяется зависимостью: $b_4'=c_4 \cdot \psi/2\pi \cdot \omega_3=5,9 \cdot 10^8 \cdot 0,15/6,28 \cdot 975,42=1,44 \cdot 10^4$ н · с/м. Здесь ω_3 - собственная парциальная частота колебаний шлифовальной бабки; ψ - относительное рассеяние энергии колебаний направляющих качения.

$\omega_3=\sqrt{C_4/(m_2+m_3)}=975,42 \text{ с}^{-1}$. $f_3=155,32$ гц. В данном случае m_2 - масса круга с закреплёнными деталями. Рассмотрен круг высотой 63 мм. m_3 - масса шлифовальной бабки с закреплёнными на ней агрегатами.

Постоянная времени коэффициента демпфирования для механизма подач $T_b''=c_4 \cdot \sum_{i=1}^n T_{bi}/C_i$, где T_{bi} - постоянные времени коэффициента демпфирования каждого

элемента механизма подач[1 и др.]. Для станка 3М152ВФ20 величина $T_b''=1,59 \cdot 10^{-4}$ с и тогда $b_4''=T_b'' \cdot c_4=9,38 \cdot 10^4$ н · с/м. Суммарный коэффициент демпфирования составит $b_4=10,82 \cdot 10^4$ н · с/м.

В результате проведения вычислений получены исходные данные для динамического расчёта схемы рис.1.

Далее необходимо записать дифференциальные уравнения движения для рассматриваемой динамической системы. Решение этих уравнений с целью получения АЧХ целесообразно провести на ЭВМ с использованием пакета прикладных про-

грамм «Continue Control» (CC) для исследования линейных систем автоматического регулирования. Этот пакет программ решает систему линейных дифференциальных уравнений в аналитическом виде, а также строит АЧХ в комплексной плоскости и в логарифмических координатах при известных численных значениях постоянных величин исходной системы дифференциальных уравнений.

Для определения и анализа относительных колебаний между кругом и деталью целесообразно использовать структурную схему[4] с использованием для расчётов пакета Системы Автоматического Моделирования (СИАМ). Ввод данных осуществляется в виде структурной схемы объекта. Эта схема набирается из стандартных блоков по аналогии с составлением схемы моделирования на АВМ. В результате такого моделирования, за счёт изменения параметров динамической системы удаётся получить минимум относительных колебаний между кругом и деталью, что позволяет добиться наилучших показателей обработки.

При отсутствии названных пакетов программ решение дифференциальных уравнений может осуществляться традиционными методами, применяемыми в теории колебаний, однако для этого потребуются большие затраты времени.

Выводы. 1. В работе определены значения жёсткостей и коэффициентов демпфирования в основных элементах динамической системы круглошлифовального станка. 2. Наличие этих параметров позволяет в дальнейшем осуществлять предварительный расчёт при проектировании нового оборудования и моделирование динамической системы станка с использованием прикладных пакетов программ.

Литература: 1. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков.- // Машиностроение, М. 1978, 199 с. 2. Пуш В.Э. Конструирование металлорежущих станков // Машиностроение, М. 1977, 390 с. 3. Глаговский Б.А. и др. К вопросу об оптимальном выборе абразивного круга с позиций контактной жёсткости. Тез. докл. науч.-технич. семинара, // Оптимшлифабразив-78, 1978, г. Челябинск, с.24-25. 4. Серховец О.И., Фесенко А.В., Ушаков А.Н. Математическая модель определения динамических характеристик круглошлифовального станка. //Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве, Вісник інженерної академії України. 1-3 листопада 2000.- Харків, с.140-143. 5. Серховец О.И. Разработка данных для динамических расчётов подсистемы закрепления деталей на круглошлифовальных станках с адаптивным управлением // Вестн. НТУ «ХПИ», 2004. №44. 6. Орликов М.Л. Динамика станков. //Выща школа, Киев., 1989, 272 с. 7. Торлин В.Н., Баталин А.С. Финишные операции в гибком автоматизированном производстве, //Техника, -Киев, 208 с.

УДК 621.91.678.5

ТОЧІННЯ СКЛОПЛАСТИКІВ АЛМАЗНИМ ІНСТРУМЕНТОМ

Хавін Г.Л., канд. техн. наук (м. Харків, Україна)

The possibilities of using diamond tools for cutting of fiber glass are considered. The basic dates of tools parameters are presented. The software for calculation of cutting parameters diamond tool is developed. The recommendations of speed, feeding and cutting depth for diamond tools are presented.

Інтенсифікація і поширення обробки виробів із склопластиків точінням потребує підвищення продуктивності праці і забезпечення високої якості обробленої поверхні, що на теперішній час неможливо без застосування алмазного інструменту. З практики відомо, що стійкість інструменту із сплаву ВКЗМ оптимального загострення, при обробці склопластику ЕФБ-П складає не більш 60 хв. при швидкості 80-120 м/хв., а склопластику П-5-2 – не перевищує 30 хв. при швидкості 20-30 м/хв. [1]. При цьому підвищення швидкості різання значно знижує стійкість інструменту, під-

вищення подачі погіршує якість обробленої поверхні. Точіння твердосплавним інструментом забезпечує задані параметри шорсткості тільки у перші хвилини роботи різця. Таким чином, для якісної обробки склопластиків, особливо при чистовій тонкій обробці, необхідно застосовувати алмазний інструмент.

Алмазне точіння рекомендують запровадити для чистової обробки з шорсткістю поверхні $\nabla 5-\nabla 6$. Розроблено достатньо багато різних конструкцій різців із своїми геометричними характеристиками [1-3], рис.1. У якості оптимальних геометричних параметрів при точінні склопластиків рекомендують такі значення [2]: передній кут $\gamma=20^\circ$; задній кут $\alpha=0-2^\circ$; головний кут у плані $\varphi=45^\circ$; допоміжний кут $\varphi_1=20^\circ$; довжина ріжучої кромки 0,2-0,3 мм. Данні других авторів [1,3,4] приблизно такі ж самі з невеликими відхиленнями, що пояснюється експериментами з різцями, що мають різне конструктивне виконання.

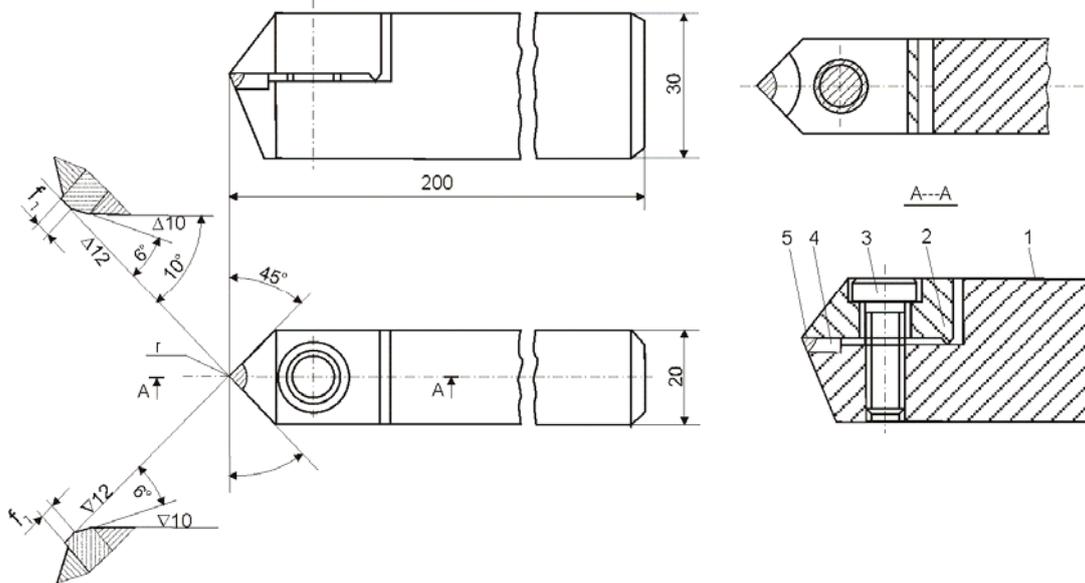


Рис.1. Збірний алмазний різець [1]: 1 – корпус; 2 – накладний притиск; 3 – гвинт; 4 – ріжуча вставка; 5 – алмазне зерно.

Для операції тонкого точіння ($\nabla 5-\nabla 6$) слід рекомендувати такі технологічні параметри (режими) різання: достатньо малі січення зрізу $t=0,3-0,65$ мм при швидкості різання $V=700-1000$ м/хв і подачі $s=0,01-0,06$ мм/об.

З практики використання алмазного інструменту при обробці склопластиків відомо, що алмазні різці не тільки підвищують якість обробленої поверхні, але також значно підвищують продуктивність виробництва. При цьому стійкість різців при зносі, що не перевищує критичний (не більш 0,14-0,16 мм), більш ніж у 20 разів у порівнянні з твердосплавними різцями. По даним [1] застосування різці конструкції на рис.1 на чистовому та пів чистовому точінні склопластиків без тонкого алмазного точіння дозволило підняти продуктивність обробки у 5 разів. Для таких операцій рекомендовано для одержання шорсткості $\nabla 5-\nabla 6$ подачу не більш 0,1-0,2 мм/об.

Одержані значення параметрів шорсткості у великій мірі залежать від структури матеріалу, що обробляється. Наприклад, для склопластику залежність шорсткості обробки поверхні R_z від швидкості різання V показує, що при точінні загостреним твердосплавним інструментом склопластику з неорієнтованим розташуванням скловолокон у порівнянні з точінням алмазним різцем погіршується незначно .

Однак вже при зносі твердосплавного різця по задній кромці 0,10 мм шорсткість знижується на один клас [3].

При використанні алмазного інструменту шорсткість поверхні, що можна одержати як результат точіння склопластику з глибинами різання 0,05 та 1,5 мм практично однакова у всьому діапазоні швидкості обробки. При цьому все ж таки при обробці у рівних умовах для склопластику з орієнтованим скловолокном, що виготовляється методом намотування, шорсткість обробленої поверхні на один клас вище у порівнянні з неорієнтованим матеріалом і склопластиком виготовленим методом пресування.

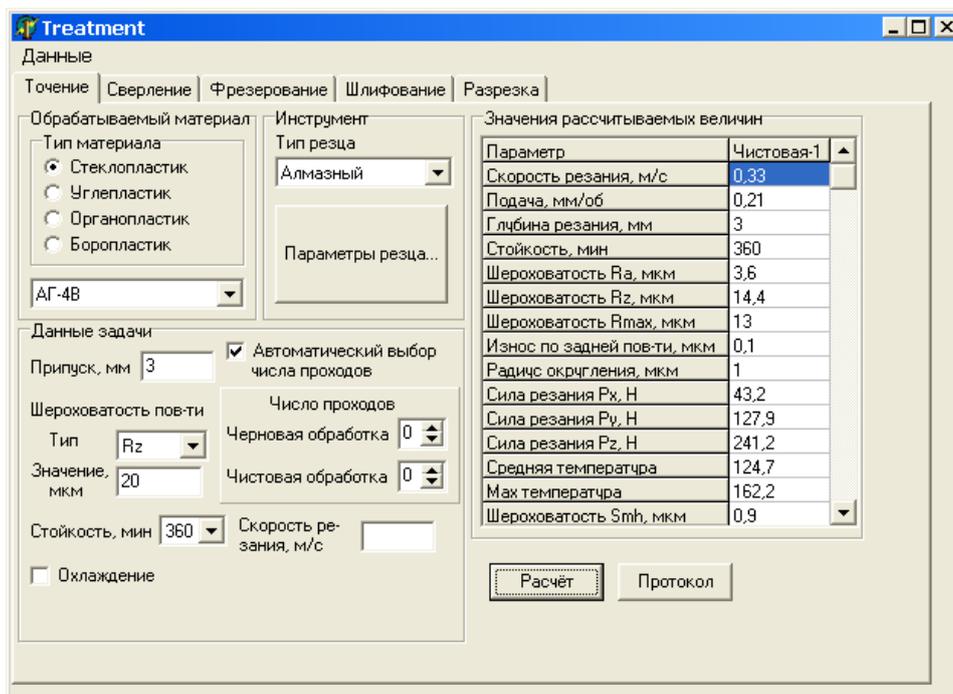


Рис.2. Загальний вигляд екрану для розрахунку режимів різання алмазним інструментом.

Як вказано у [3] високопродуктивне алмазне точіння склопластиків з подачею до 0,2 мм/об при глибині різання до 1,5 мм забезпечує той самий клас чистоти поверхні, що і тонке алмазне точіння. При цьому продуктивність обробки підвищується у 5 разів і більше внаслідок збільшення швидкості різання до 250-500 м/хв. при одночасному збільшенні стійкості до 30 годин.

Точіння склопластиків алмазними різцями повинна проводитись з урахуванням величини максимального вильоту алмазного зерна з державки. Численні спостереження та експерименти дозволили зробити висновок, що глибина точіння не повинна перевищувати 0,8-0,9 вильоту різця. Це дозволяє проводити обробку з глибинами різання до 1,5 мм при величині зерна алмаза 0,8-1,0 карат.

Для розрахунків раціональних значень технологічних параметрів обробки точінням різних композиційних матеріалів було створено математичне забезпечення (рис.2). Алгоритм розрахунків базується на співвідношеннях і кі-

Для розрахунків раціональних значень технологічних параметрів обробки точінням різних композиційних матеріалів було створено математичне забезпечення (рис.2). Алгоритм розрахунків базується на співвідношеннях і кі-

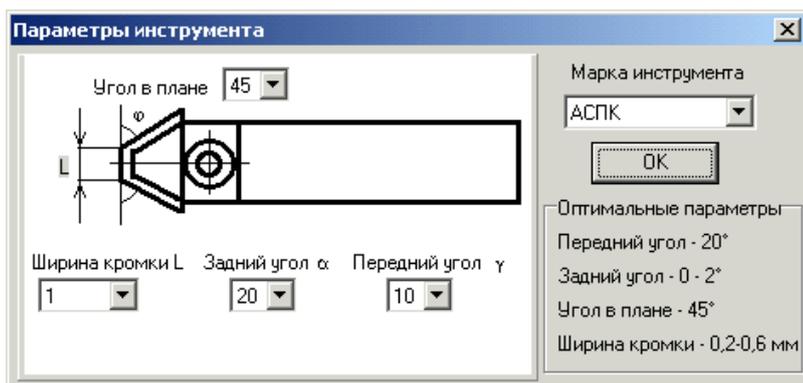


Рис. 3. Загальний вигляд екрану для завдання даних по алмазному інструменту.

лькісних даних наведених у роботі [2]. У якості інструменту використовувалися різні варіанти загострення конструкції інструменту, що надано на рис.3. Як матеріал ріжучої крайки застосовуються синтетичні алмази марок АСБ і АСПК. В результаті підрахунків можна одержати раціональні значення швидкості і подачі обробки, при завданих значеннях глибини різання, стійкості, шорсткості та інше, або значення стійкості і подачі при відомій швидкості обертання. Окрім цих величин підраховуються такі параметри. Як зношування інструменту, сили різанні, температура у осередку деформації та інше.

Роботу виконано в межах проекту М2305, що фінансується міністерством освіти і науки України.

Література: 1. Тихомиров Р.А., Николаев В.И. Механическая обработка пластмасс.- Л.: Машиностроение, 1975.- 206 с.2. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. –Л.: Машиностроение. Ленигр. отд-ние, 1987.- 176 с. 3. Руднев А.В., Королев А.А. Обработка резанием стеклопластиков. – М.: Машиностроение, 1969.- 119 с. 4. Буловский П.И., Петрова Н.А. Механическая обработка стеклопластиков. - Л.: Машиностроение, 1969.- 152 с.

УДК 621.923

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ АБРАЗИВНОГО ШЛИФОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

Анельчик Д.Е., докт. техн. наук, (г. Одесса, Украина)

Temperature characteristics of thermal criterion of processing by grinding for various coverings are determined.

Высокопроизводительное шлифование обеспечивается при максимальных значениях скоростей продольной подачи и подачи на глубину. Однако увеличение скорости продольной подачи способствует росту временных и остаточных растягивающих напряжений в приповерхностном материале, а увеличение глубины шлифования приводит к росту напряжений в местах неоднородности строения материала. В каждом конкретном случае необходимо учитывать особенности строения и свойств обрабатываемого материала. В особой мере это относится к обработке деталей с покрытиями [1].

Установлено, что при определении уровня критических температур необходимо разделять композиции деталей с покрытиями на три основные группы по виду образующихся дефектов – поверхностные трещины, отслаивания покрытия и прижоги, которые предопределяют две различные характеристики теплового критерия бездефектной обработки – критическую температуру на поверхности покрытия, а также на границе раздела покрытия с основным металлом или при ограничении по прижогу, – на фиксированной глубине, определяемой величиной остающегося припуска.

Рассмотрим определение этих уровней критических температур для ряда покрытий:

- диффузионных: нитридного и боридного, гальванического;
- хрома; напыленных – молибдена и композиции карбида титана на основе никеля.

С целью выявления области режимов резания, обеспечивающих бездефектную обработку, и определение параметров температурного поля, соответствующих этим режимам, проведено численное моделирование прочностного состояния поверхност-

ного слоя композиции с этими покрытиями при различных режимах резания. В качестве основного металла при моделировании принята сталь 45 для боридного покрытия и покрытий из молибдена, хрома, для нитридного покрытия – сталь 38ХМЮА.

Стали с диффузионным нитридным и боридным покрытиями относятся к группе материалов неоднородного строения, но обладающих хорошей связью покрытия с основным металлом. Основным дефектом при обработке являются поверхностные трещины, что и является фактором, ограничивающим производительность обработки.

В качестве примера выбора критических температур рассмотрим моделирование прочности поверхностного слоя для детали с боридным покрытием. Исследования показали, что при шлифовании кругом из карбида кремния увеличение скорости продольной подачи в исследованном диапазоне глубин резания ведет к росту временного коэффициента запаса прочности (КЗП) и снижению остаточного. Увеличение глубины резания приводит к снижению временного КЗП и повышению остаточного КЗП. При скорости продольной подачи $V_s=0,15$ м/с области разрушения образовались при глубинах резания $8 \cdot 10^{-3}$ м и более. Таким образом, при принятых условиях теплообмена ($B=31200$ Вт/м²) и скорости продольной подачи ($V_s=0,15$ м/с) разогрев приповерхностного слоя при нагреве свыше 1200 К (при глубине шлифования $8 \cdot 10^{-3}$ м имеем $T_{max}=1280$ К) приводит к образованию поверхностных трещин. При шлифовании с глубиной $6 \cdot 10^{-3}$ м разрушение не произошло, однако временной КЗП имеет величину близкую к 1 (КЗП равен 1,05), что свидетельствует о возможности разрушения. Данный режим следует считать критериальным при заданной V_s по условию обеспечения отсутствия трещин на обработанной поверхности данной композиции. В качестве критериальной температуры следует принять максимальную температуру на поверхности детали в зоне нагрева, соответствующую максимальной при критериальном режиме и несколько меньше ее – $T_{кр}=1100$ К.

При моделировании с продольной подачей 0,05 м/с области разрушения образовались при глубинах резания $6 \cdot 10^{-3}$ м и более. Таким образом, при $V_s=0,05$ м/с в качестве критериальной температуры следует принять температуру при $S_x=4 \cdot 10^{-6}$ м, т.е. $T_{кр}=1150$ К. Аналогично, при $V_s=25$ м/с, $T_{кр}=1100$ К.

Определено влияние режимов резания на прочностное состояние приповерхностного слоя при обработке эльборовым кругом. Моделирование проводилось при продольной подаче 0,25 м/с, как обеспечивающей минимальный уровень температур и при отсутствии ограничения по стойкости круга. Снижение остаточного коэффициента запаса прочности с увеличением глубины резания при шлифовании эльборовым кругом объясняется сравнительно низким уровнем получаемых температур и локализацией их в приповерхностном слое материала. Как следствие, основной материал оказывает незначительное деформационное воздействие на покрытие в период медленного охлаждения. Формирование остаточных напряжений происходит под деформационным воздействием переходных слоев самого покрытия, что уменьшает эффективность снижения растягивающих напряжений в приповерхностном слое материала. Поэтому с ростом глубины шлифования снижается не только временной КЗП, но и остаточный, т.е. остаточное физико-механическое состояние приповерхностного слоя материала ухудшается. Области разрушения в приповерхностном слое при данных условиях не образовались. Поэтому в качестве критериального для назначения режимов резания принято остаточное прочностное состояние материала

при КЗП=1,2. Таким образом, при шлифовании данной композиции эльборовым кругом при $V_s=0,25$ м/с в качестве критериальной температуры принимается температура при $S_x=4 \cdot 10^6$ м, $T_{кр}=500$ К. Необходимо отметить, что выбор критериальных параметров температурного поля производится для фиксированных значений величин продольных подач и условий теплообмена, что позволяет учитывать влияние теплообмена с СОТС в виде постоянной поправки, не зависящей от основного параметра управления – подачи на глубину. Предполагается, что условия теплообмена в процессе обработки не изменяются.

Результаты определения уровней критериальных температур для различных условий обработки при шлифовании боридного, нитридного покрытий и покрытия из композита карбида титана на основе никеля, приведены в таблице. При обработке покрытий из напыленного молибдена и гальванического хрома определяющими является дефект типа отслоения покрытия, в связи с этим в качестве критериальных выступают критические температуры у границы раздела покрытие–основной металл.

Методика определения уровней критических температур аналогична рассмотренной при обработке боридного покрытия и основана на моделировании напряженно-деформированного состояния и прочности на границе раздела в зависимости от режимов резания при одновременном фиксировании параметров температурного поля до появления на границе раздела разрушения. Температура, соответствующая данному режиму и несколько ниже ее, принята равной критериальной. Результаты по определению уровней критериальных температур для напыленного молибдена и гальванического хрома приведены в таблице.

Таблица

Уровни критериальных температур для бездефектной обработки деталей с некоторыми покрытиями

№ п/п	Материал покрытия	Уровни критериальных температур $T_{кр}$, К					
		на поверхности детали			на границе раздела		
		Диапазон изменения скоростей продольных подач V_s , м/с					
		0,05...0,1	0,1...0,15	>0,15	0,05...0,1	0,1...0,15	>0,15
1	Диффузионное нитридное покрытие	1040	970	920	–	–	–
2	Диффузионное боридное покрытие	1150	1100	1060	–	–	–
3	Напыленный композит основа никель + карбид титана	930	860	790	–	–	–
4	Гальваническое хромовое покрытие	–	–	–	410	470	530
5	Напыленное молибденовое покрытие	–	–	–	510	570	600

Проверка адекватности определения напряжений и прочности материала детали с покрытием осуществлялась при обработке напыленного молибденового покрытия и диффузионного боридного. При обработке молибденового покрытия, напыленного на сталь 45, выбраны два режима: первый должен обеспечить бездефектную обработку, второй – привести к отслоению покрытия.

Бездефектный режим шлифования: круг 24А40ПСМ26К5, $V_k = 35$ м/с; $V_s = 0,15$ м/с, $S_t = 0,01 \cdot 10^{-3}$ м, толщина покрытия после шлифования $\Delta_1 = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м. Исследование образца, обработанного на этом режиме, показало отсутствие подповерхностных трещин на границе раздела покрытия и основного металла. Второй образец обрабатывался на том же режиме, что и первый, однако толщина покрытия после завершения эксперимента составила $\Delta_2 = 0,3 \cdot 10^{-3}$ м. Расчетное значение температуры при этом $T = 650$ К, что превышает уровень критических температур. На срезе данного образца, сделанного после эксперимента, обнаружены подповерхностные трещины в виде отслоений покрытия (рис. 1).

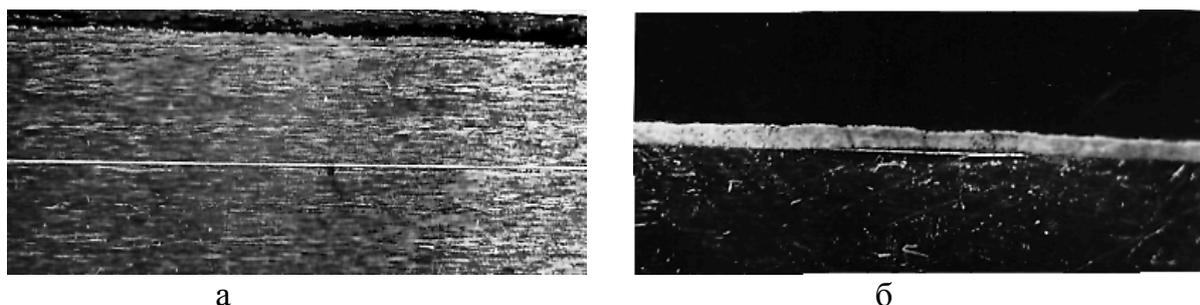


Рис. 1. Характер трещинообразования при шлифовании детали с напыленным молибденовым покрытием: круг 24А40ПСМ26К5; $V_k = 35$ м/с; $V_s = 0,15$ м/с; $S_t = 10 \cdot 10^{-6}$ м; $\Delta = 300 \cdot 10^{-6}$ м; а – отрыв покрытия; б – подповерхностная трещина.

При обработке образцов с боридным покрытием выбраны режимы обработки: круг 63С25СМ16К5, $V_k = 35$ м/с, обеспечивающие в соответствии с результатами расчетов:

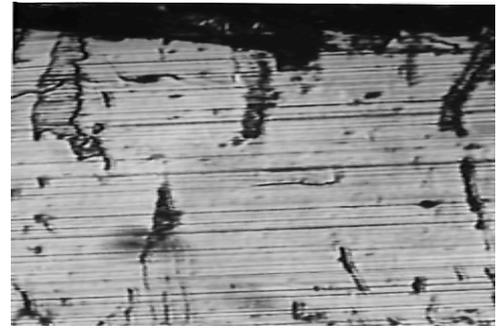
- а) бездефектную обработку (режимы № 1, 2): $V_s = 0,15$ м/с, $S_t = 4; 5 \cdot 10^{-6}$ м при толщинах покрытия 200 и 150 мкм соответственно;
- б) низкий минимальный коэффициент запаса прочности в период быстрого охлаждения (режимы № 3, 4, 5): $V_s = 0,15$ м/с, $S_t = 6 \cdot 10^{-6}$; $V_s = 0,05$ м/с, $S_t = 4; 6 \cdot 10^{-6}$ м;
- в) получение поверхностных трещин (режимы № 6, 7, 8, 9): $V_s = 0,15$ м/с; $S_t = 8; 12 \cdot 10^{-6}$ м; $V_s = 0,05$ м/с; $S_t = 8; 12 \cdot 10^{-6}$ м.

Регистрация трещин на обрабатываемой поверхности осуществлялась двумя методами: оптическим и контактным. Оптический метод заключался в визуальном осмотре обработанной поверхности с помощью микроскопа с последующим фотографированием. Для определения размеров трещин в плане, съемка проводилась с использованием масштабной сетки с шагом 0,01 мм. Регистрация трещин контактным методом осуществлялась на профиллографе-профиллометре с помощью записи профиллограмм. Специально разработанная методика регистрации поверхностных трещин с помощью контактного метода приведена в работе [2].

На поверхностях образцов, обработанных по режимам бездефектной обработки, трещин не обнаружено. Трещинообразование при режимах вероятного образования дефектов (с низким коэффициентом запаса прочности) характеризуется отдельными микротрещинами, ориентированными в основном перпендикулярно направлению вектора продольной подачи. Контрольные записи профиллограмм не позволили произвести идентификацию трещин подобного вида среди микронеровностей рельефа. Однако наличие подобных микротрещин свидетельствует о неблагоприятном нарушении целостности материала.



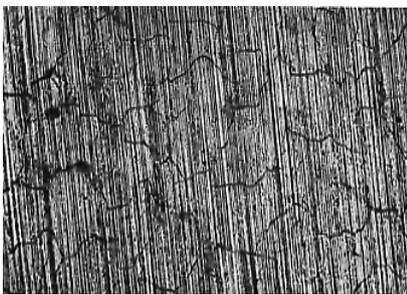
а



б

Рис. 2. Характер трещинообразования на шлифованной поверхности детали с боридным покрытием в зависимости от режимов обработки: круг 63С25СМ16К5; $V_k = 35$ м/с; а – на поверхности детали: режимы $V_s = 0,15$ м/с; $S_t = 8 \cdot 10^{-6}$ м; увеличение 160; б – в сечении, перпендикулярном к поверхности детали: режимы те же, $\Delta = 150 \cdot 10^{-6}$ м; увеличение 650.

Характер дефектов на обработанной поверхности при шлифовании с режимами, приводящими к разрушению, показан на рис. 3 и рис. 4. При шлифовании с режимом № 6 (рис. 2) на поверхности образуются трещины, ориентированные в основном перпендикулярно направлению шлифования. Между собой трещины не соединены. Глубина распространения – от 0,01 до 0,03 мм. При шлифовании с режимами № 7 и 8 образуется сетка поверхностных трещин, расстояние между краями сетки вдоль направления продольной подачи составляет 0,2...0,3 мм (рис. 3, а,б). Следует отметить, что трещины у края сетки перпендикулярного направления продольной подачи более раскрыты.



а



б



в

Рис. 3. Характер трещинообразования на шлифованной поверхности детали с боридным покрытием в зависимости от режимов обработки: круг 63С25СМ16К5; $V_k = 35$ м/с; а – режимы резания: $V_s = 0,15$ м/с; $S_t = 12 \cdot 10^{-6}$; увеличение 240; б – $V_s = 0,05$ м/с; $S_t = 8 \cdot 10^{-6}$; увеличение 70; в – $V_s = 0,05$ м/с, $S_t = 12 \cdot 10^{-6}$; увеличение 50.

Характер разрушения при шлифовании с режимом № 9 показан на рис. 3. На обратной поверхности видны трещины и участки со сколотым покрытием. Изучение шлифов, сделанных перпендикулярно обработанной поверхности показало, что глубина распространения трещин при режимах № 7 и 8 составляет 50-80 мкм, при толщине покрытия 140-150 мкм. Крупные сколы покрытия, наблюдаемые при шлифовании на режиме № 9, охватывают около 2/3 толщины покрытия и не достигают основного металла.

Результат профиллографирования участка поверхности, обработанной на режиме № 7, приведен на рис. 4. Профиллографирование производилось в направлении следов обработки, как наиболее информативного по выявлению размеров поперечного сечения трещин. В силу конструктивных особенностей вершин щупа (конус

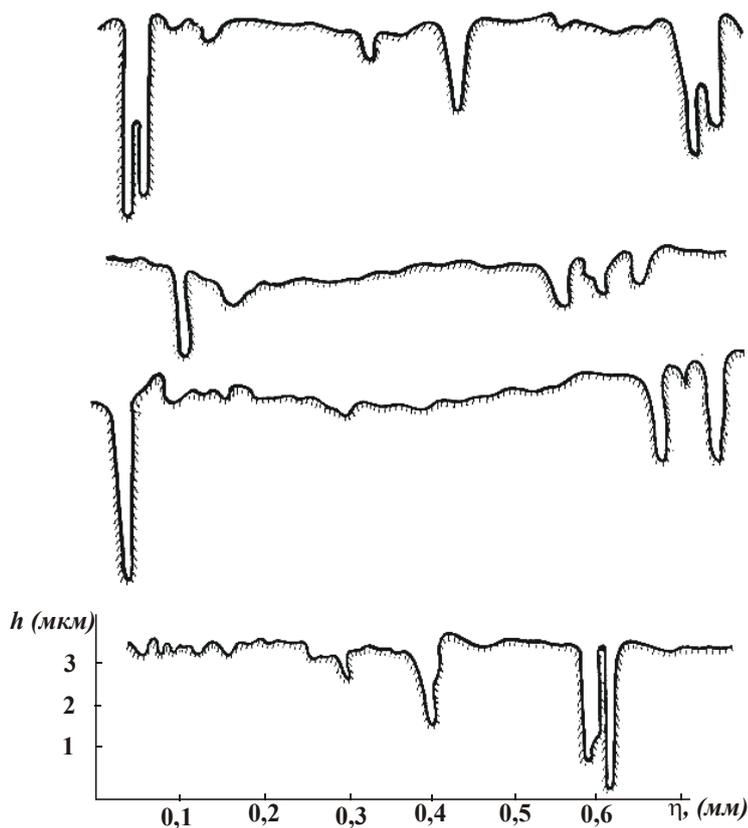


Рис. 4. Профиллограммы поверхности образца после шлифования: материал – боридное покрытие; $V_k = 35$ м/с; $V_c = 0,15$ м/с; $S_r = 12$ мкм.

со сферой при вершине радиусом 10 мкм) проникновение его в трещину ограничено. Имеет место “недощупывание” “вершины трещины”, т.е. высотные параметры определяются с некоторой погрешностью. При выделении трещин по профиллограммам определялось расстояние между трещинами. Как видно на приведенной профиллограмме, расстояние между трещинами в направлении продольной подачи колеблется в пределах 25-30 мкм, что совпало с результатами оптического контроля.

Проведенное комплексное исследование характера трещинообразования показало достаточно хорошую адекватность описания прочности поверхностного

слоя детали с покрытием в ходе численного моделирования.

Литература: 1. Анельчик Д.Е., Усов А.В. Исследование причин трещинообразования при шлифовании деталей с покрытием // Изв. ВУЗов. Машиностроение. – 1987. – Вып. 11. – С. 134-139. 2. Анельчик Д.Е., Деревянченко А.Г., Сазонов И.П. Методика регистрации дефектов поверхности после абразивной обработки / ОПИ. – Одесса, 1987. – 11 с. – Деп. в УкрНИИНТИ 06.03.87, № 918-Ук87.

УДК 65.011.1

ИНТЕГРИРОВАНИЕ КОНСТРУКТОРСКОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ УНИФИЦИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Ларшин В.П., докт. техн. наук, проф., **Челиканов Г.М.** (г.Одесса, Украина)

An integrated manufacturing system construction method on the basis of unified technologies is worked out.

1. Классификация объектов и модульный принцип в машиностроительном производстве. Известно, что классификация является неотъемлемым признаком научного знания. Это такой структурный анализ в заданной предметной области, который позволяет разделить изучаемые объекты на группы по некоторым существенным признакам, предопределяющим наиболее важные свойства этих объектов. Само деление объектов на группы является примером экономии средств, т.е. связано с экономией затрат живого и овеществленного труда. Всякое иное решение, не содержащееся в классификации, сопряжено с дополнительными затратами. Можно сказать, что классификация это своего рода качественное измерение (оценка) по определён-

ным критериям, которые гарантируют приемлемый по затратам результат исходя из прошлого опыта. В этой связи классификация, как метод упорядочивания объектов находит своё дальнейшее развитие в стандартизации, унификации и сертификации производственных процессов.

2. Унифицированные технологические процессы (типовые и групповые), как база для модульного принципа в технологии. Модульный принцип в машиностроительном производстве является дальнейшим развитием общенаучного метода классификации и распространяется как на конструкторскую (КПП), так и на технологическую (ТПП) подготовку производства. При этом базой модульного принципа в технологии являются типовые и групповые технологические процессы.

Основу построения типовых технологических процессов составляет общность конструктивных элементов (признаков, особенностей) изделий и вытекающая из этого общность технологии их изготовления (обработки и сборки). Типизация технологических процессов является основной формой их стандартизации [1]. Она способствует снижению затрат на разработку технологических процессов, ускорению этих разработок, а также уменьшению трудоёмкости и себестоимости производства изделий. Цель типизации – стандартизовать технологические процессы для того, чтобы обработка и сборка одинаковых и сходных по конструкции изделий осуществлялась одними и теми же, наиболее совершенными и эффективными методами при использовании одних и тех же СТО (оборудование, приспособления, инструмент, средства механизации и автоматизации и т.п.). Типизация позволяет устранить повторение одних и тех работ технолога и, следовательно, сократить длительность и объём технологической подготовки производства. Известны три направления типизации: технологических процессов безотносительно к изделиям; технологических процессов с учётом реальных изделий; на основе сочетания первого и второго случаев [1]. На наш взгляд первое направление обеспечивает преемственность между типовыми и групповыми технологиями.

Первым и наиболее важным этапом типизации технологических процессов является классификация изделий машино- и приборостроения по конструктивным признакам изделий и их размерам. Каждый класс изделий разбивают на подкласс, затем – на группы и подгруппы. Для изделий, входящих в одну классификационную группу, обобщают решения технологических задач с целью исключения индивидуального подхода при разработке технологических процессов обработки и сборки конкретных изделий и их элементов. Отсюда следует, что общность конструктивных элементов изделий не является достаточной для классификации, которая в своей основе должна иметь технологический характер. Например, совершенно одинаковые по конструктивным признакам детали, но изготавливаемые из разных материалов (чугун, сталь, цветные сплавы или пластмасса) часто не могут быть объединены термином «типовое изделие». И дело не только в том, что необходимо разделять стружку для её последующей утилизации. Свойства обрабатываемого материала влияют на точность обработки, режимы резания, выбор средств технологического оснащения (СТО) и т.п. Типовое изделие (или его составная часть) объединяет совокупность изделий, имеющих одинаковый технологический маршрут или план операций, осуществляемых на однородном технологическом оборудовании с применением однотипных приспособлений и инструментов. Кроме того, классификация должна учитывать тип производства, частоту сменяемости объекта производства, технические требования и условия к этому объекту и т.п. Таким образом, сложность

классификации заключается в том, что классификационные признаки только частично содержатся в конструктивном исполнении изделий. Другая (невидимая явно) часть этих признаков вытекает из общности технологических процессов и систем.

Вторым этапом типизации технологических процессов изготовления изделий является разработка принципиально общего технологического процесса с установлением типовой последовательности и типового содержания операций, типовых схем базирования и типовых конструкций технологической оснастки. Если изделия достаточно полно унифицированы, то на них составляют одну общую технологическую карту, содержащую даже нормы времени. При меньшей степени унификации разрабатывают принципиальный технологический процесс, на основе которого составляют технологические процессы для конкретных изделий. По мере совершенствования технологии обработки деталей и сборки изделий типовые технологические процессы необходимо периодически корректировать. Разработанные типовые процессы обработки и сборки оформляют на картах типовых технологических процессов. Эти процессы целесообразно применять на заводах и фирмах серийного и массового производства с устойчивой номенклатурой изделий. В тоже время для условий индивидуального, мелкосерийного и серийного производства выгодно применять принципы групповой технологии.

Основу групповых технологических процессов обработки и сборки составляет, прежде всего, общность технологических переходов и операций, а также СТО. Возможна также частичная общность конструктивных элементов изделий. В этом случае применительно к механической обработке разрабатывают так называемую комплексную деталь, а применительно к сборке – комплексное изделие. Комплексная деталь предопределяет комплект используемого при обработке режущего и мерительного инструмента. Поэтому фактическое наличие инструмента может оказывать влияние на количество деталей в группах (или подгруппах) и, следовательно, на конструктивное исполнение комплексной детали. Принципы групповой технологии позволяют в условиях индивидуального, мелкосерийного и серийного производства осуществлять технологические процессы изготовления изделий, характерные для крупносерийного и массового производства, переходить к поточному производству [1-3]. Повышается непрерывность, прямоточность и ритмичность производства. Возможна организация групповых поточных линий, когда оборудование располагают по маршруту изготовления деталей или изделий, входящих в группу. Так при групповой сборке все закреплённые за линией изделия собирают периодически пропускаемыми партиями, и в каждый данный момент линия работает как непрерывно-поточная. Переход от сборки одного изделия к другому возможен без переналадки линии или при частичной и несложной переналадке. Оборудование линии комплектуют и располагают по технологическому маршруту сборки наиболее сложного и трудоёмкого изделия в группе – комплексного изделия. Другие изделия группы можно собирать с пропуском отдельных переходов и операций. Реже используют другой способ групповой сборки, когда на линии одновременно собирают весь комплект изделий группы [1]. В этом случае линия всё время работает как непрерывно-поточная без переналадки оборудования. Приспособления для такой сборки многоместные, более сложные и более крупных размеров. Таким образом, принципы групповой технологии позволяют обеспечить при сборке собираемость стандартизованных и унифицированных деталей в механизме, а при их обработке – наименьшую номенклатуру используемых станочных приспособлений и применяе-

мого режущего и мерительного инструмента (СТО).

На разработку группового технологического процесса затрачивают значительно больше времени, чем на индивидуальный процесс, однако в расчёте на отдельно взятое изделие затраты на технологическое проектирование снижаются в несколько раз. На снижение себестоимости изготовления продукции влияет стандартизация и унификация технологической оснастки и увеличение размера партии (для серийного производства).

Применительно к компьютерным технологиям несомненный интерес и значение имеют алгоритмы формирования групп и подгрупп изделий из имеющихся в компьютерной базе данных технологических маршрутов изготовления отдельных деталей и изделий. Одним из таких алгоритмов может быть следующий. Пусть имеются, например, три приведённые ниже маршрута (для трёх разнотипных деталей).

- 1) ЗАГ – ТОК – СЛ – ФРГ – СЛ – ГАЛ – К;
- 2) ЗАГ – ТОК – СЛ – СВ – ТО – ШЛ – К;
- 3) ЗАГ – ФРГ – СЛ – СВ – ТО – ШЛ – К.

Здесь введены обозначения операций: ЗАГ – заготовительная, ТОК – токарная, СЛ – слесарная, ФРГ – фрезерно-горизонтальная, ГАЛ – гальваническая, К – контрольная, СВ – сверлильная, ТО – термообработка, ШЛ – шлифовальная. Общность технологических операций позволяет сгруппировать указанные детали следующим образом (в скобках указано количество деталей в группе): ЗАГ(3), ТОК(2), СЛ(3), ФРГ(2), ТО(2), ШЛ(2), К(3). В свою очередь сформированные группы могут быть разделены на подгруппы по общности технологического оборудования и технологической оснастки (станочные приспособления, режущий и мерительный инструмент). Например, группа деталей ТОК(2) может быть разделена на подгруппы в зависимости от диаметра (по шкале интервалов), длины (по шкале интервалов) и материала обрабатываемого прутка, класса точности токарного станка и т.п. (в группе может быть больше, чем указанные 2 детали, например, 20 или 200 деталей). Критерием правильно сформированной подгруппы, очевидно, является возможность непрерывной (без существенной переналадки) обработки всех деталей, входящих в подгруппу. Другими словами, переналадка оборудования производится только при переходе на обработку деталей из другой подгруппы. Описанный алгоритм формирования технологических подгрупп можно назвать алгоритмом последовательного отсеивания деталей. Этот алгоритм позволяет, во-первых, наглядно продемонстрировать один из возможных способов формирования технологических подгрупп и, во-вторых, является примером формализации технологических решений применительно к компьютерному проектированию технологических процессов и систем.

В заключении следует отметить характерную особенность унифицированных технологических процессов: с самого начала они разрабатывались как формализованные и, следовательно, в наибольшей степени приспособленные для последующей компьютеризации и ускоренной технологической подготовки производства [4]. Однако технические возможности компьютерной техники долгое время были недостаточными для реализации на практике принципов типовой и групповой технологии. Положение кардинально изменилось с появлением IBM совместимых персональных компьютеров, оснащённых операционными системами Windows. На рынке появились многочисленные программные продукты для компьютерного проектирования технологических процессов и систем (Pro-engineer, TechCard, Master CAM, T-Flex, Компас Автопроект и т.п.). В этой связи резко возрос интерес к алгоритмическому

и программному обеспечению компьютерных систем технологического проектирования и, следовательно, к соответствующей технологической литературе.

3. Интегрирование этапов конструкторской и технологической подготовки производства на основе модульного принципа и применения компьютерных технологий проектирования. Создание интегрированных систем CAD/CAM (компьютерная интегрированная система конструкторской и технологической подготовки производства) стало возможным на основе применения компьютерных технологий проектирования. Развитие компьютерных технологий возможно только на основе системной методологии технического творчества [2], которая в свою очередь должна быть основана на определённых технологических принципах и подходах, апробированных в технологии машино- и приборостроения. К числу таких основополагающих принципов можно отнести известные принципы построения типовых и групповых технологических процессов, основанных в свою очередь на идеях стандартизации и унификации СТО. Дискретные ряды СТО по номенклатуре и размерам предполагают использование имеющихся в распоряжении технолога (и конструктора) позиций, всякое отсутствие которых приводит к резкому возрастанию трудоёмкости и себестоимости технологических процессов. Например, при разработке единичных технологических процессов изготовления (обработки и сборки) сходных изделий работа технолога многократно повторяется, подобно тому, как при выполнении компьютерной программы часто используются одни те же подпрограммы. Исходя из здравого смысла эти (одни и те же) подпрограммы не нужно каждый раз разрабатывать. Однажды разработанную подпрограмму следует многократно применять. Поэтому основная трудность при проектировании технологических процессов на основе имеющихся унифицированных (типовых и групповых) заключается в поиске, заимствовании и выборе соответствующих ранее разработанных данных. Естественно, что такая работа наиболее эффективно может быть выполнена при использовании компьютерных технологий технического творчества. Собственно говоря, именно это обстоятельство и вызывает повышенный интерес к технологическим основам построения унифицированных технологических процессов и необходимости их совершенствования применительно к компьютерному проектированию. Здесь под совершенствованием понимается прежде всего разработка алгоритмического обеспечения компьютерного проектирования, т.е. умело проведенная формализация принятия технологических решений.

4. Ускоренная конструкторско-технологическая подготовка производства (УКТПП), как пример интегрированной производственной системы. Разработанная структурная схема УКТПП является информационной моделью интегрированной производственной системы (рисунок) и состоит из двух взаимосвязанных частей: ускоренной конструкторской подготовки производства (УКПП) и ускоренной технологической подготовки производства (УТПП). На рисунке использованы следующие обозначения: ЕВ – единицы величин; STD – стандарты (ограничительные перечни ГОСТов, стандартов предприятия, нормалей); НРР – нормальные (предпочтительные) ряды размеров; НР – нормальные резьбы (резьба и гнёзда под резьбу, резьба для штуцеров); ДН – другие нормали (нормали для металлических и резиновых прокладок, посадки подшипников и т.п.); УН – унификация (перечни унифицированных элементов); КСФК – классификатор конструкторский; ПДСЕ – применимость деталей и сборочных единиц в разных изделиях ЭД – элементы деталей; КЭД – комплекты (сочетания) элементов деталей; Д – детали; СБЕ – сборочные единицы

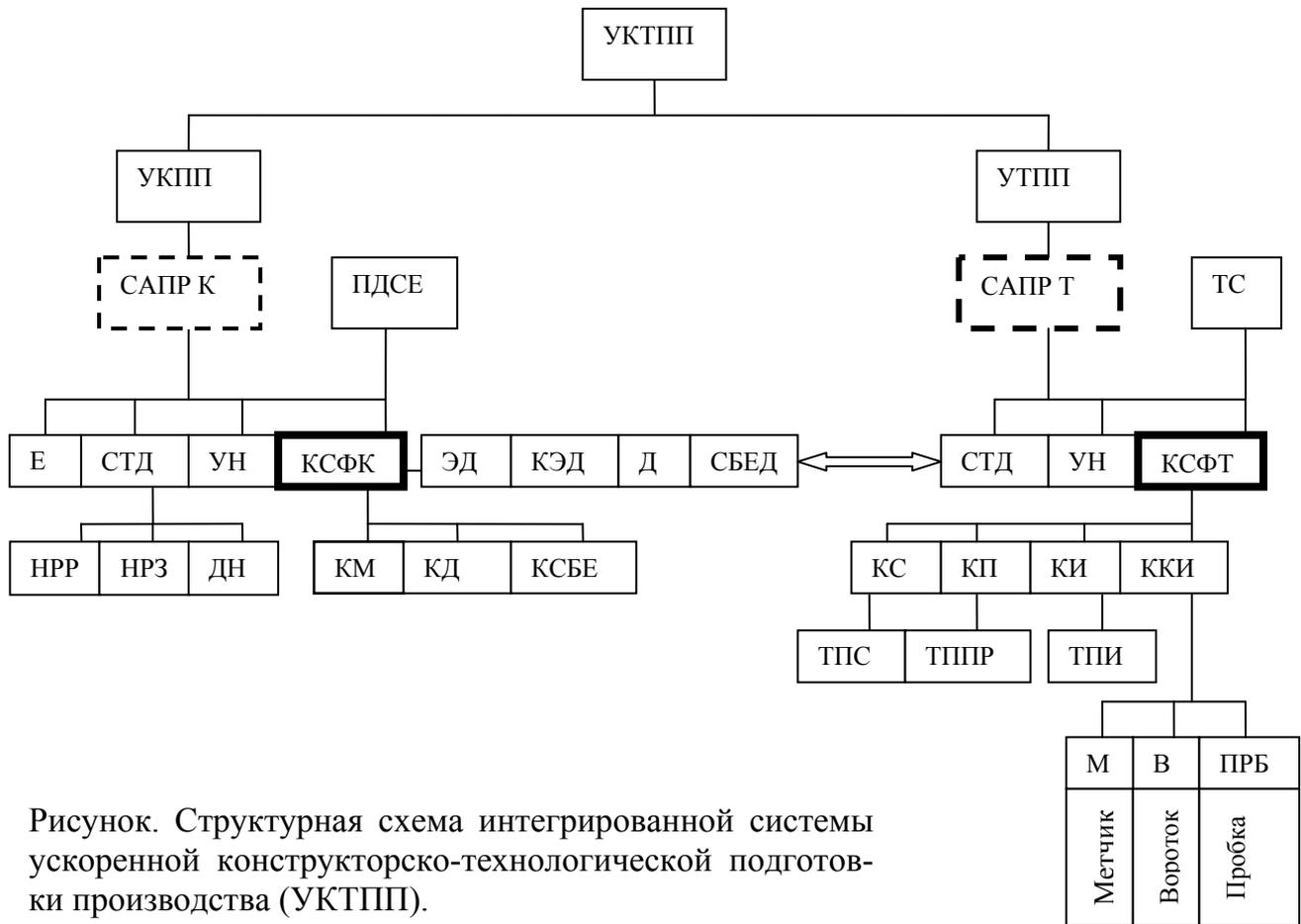


Рисунок. Структурная схема интегрированной системы ускоренной конструкторско-технологической подготовки производства (УКТПП).

(и изделия в целом); КСФТ – классификатор технологический; КС – классификатор станков; ТПС – технологические параметры станков; КП – классификатор приспособлений; ТППР – технологические параметры приспособлений (схема базирования, установочные элементы и т.п.); КИ – классификатор инструмента; ТПИ – технологические параметры инструмента; ККИ – классификатор комплектов инструмента.

Создание интегрированной системы УКТПП вызвано необходимостью сокращения времени подготовки производства [4]. В каждой из указанных подсистем (УКПП и УТПП) имеется своя база данных, открытая для пополнения. Отличительной особенностью системы УКТПП является взаимосвязь этих баз данных, которая осуществляется в процессе производства по мере появления новых конструкторских и технологических разработок. Так при разработке конструкторской документации учитываются имеющиеся технологические возможности оборудования, технологической оснастки и инструмента. Учитываются также эргономические факторы при обеспечении собираемости изделий исходя из обеспечения необходимого доступа рабочего к собираемым деталям и узлам.

Для упорядочивания работ необходимо создавать каталоги чертежей деталей и сборочных единиц, которые наиболее часто применяются в разных изделиях (блок ПДСЕ на рисунке). Использование критерия применяемости является развитием модульного принципа в машиностроении и позволяет уменьшать затраты на проектирование и изготовление, начиная с этапа конструкторской подготовки производства (КПП). По отобранным по применяемости деталям и сборочным единицам (классификация деталей по признаку применяемости) проводится их унификация. По возможности производится также замена унифицированных деталей на стандартные (по ГОСТ). Составляются ограничительные перечни стандартных и унифицированных деталей, используемых в разных изделиях. Вся эта работа осуществляется на

конкретном производстве с учётом указанных выше так называемых проектных модулей (единиц величин, предпочтительных чисел размеров и т.п.). В результате – вносятся необходимые изменения в компьютерные чертежи для последующего их согласования и окончательного утверждения, и создаётся компьютерная картотека (база данных) отобранных по применяемости деталей и сборочных единиц (в том числе унифицированных и стандартных). На этом этапе создают классификаторы материалов (КМ), деталей (КД) и сборочных единиц (КСБЕ), что отражено на рисунке. По сути своей описанный выше подход является частью идеологии построения САПР КПП.

Аналогично проводится работа по созданию ускоренной технологической подготовки производства (УТПП). При разработке технологических процессов и систем (и соответствующей технологической документации) учитываются результаты конструкторского проектирования (требования САПР УКПП). Это позволяет использовать разработанные конструкторские базы данных для этапа ТПП, например, при смене объекта производства или его модернизации. Это позволяет уменьшить количество необходимых корректировок технологической документации на этапе ТПП. Достаточно хорошим можно считать результат, при котором унификацией и стандартизацией в конструкторской документации на вновь разрабатываемое изделие охвачено 50-60 % деталей и 10-30 % узлов (сборочных единиц). Остальные детали и сборочные единицы будут результатом свободного творчества конструкторов.

На этапе ТПП проводится работа по созданию типовых и групповых технологических процессов. Такая работа облегчается после создания баз данных по этим процессам. При этом сокращается количество применяемой технологической оснастки (станочных и контрольных приспособлений) и инструмента (свёрл, метчиков, плашек и т.п.). Например, имеющаяся универсальная, специализированная и специальная оснастка может быть использована многократно в разных изделиях.

Известно, что сборка является организующим началом, под которое подстраиваются все другие технологические процессы (механо-, термообработка, контроль и т.п.). В процессе производства необходимо учитывать время сборки каждого узла, а также очередность сборки, когда после сборки какого-либо узла собирается следующий узел. Это отражают в календарных графиках узловой и общей сборки изделий. Детали для каждого узла должны быть предварительно изготовлены, проконтролированы и вовремя поданы на сборку. Те же самые требования относятся к покупным комплектующим изделиям (детали, сборочные единицы, резинотехнические изделия, смазочные материалы, изделия электротехнической промышленности и т.п.). В результате до начала сборки должны быть сформированы комплекты деталей и сборочных единиц для сборки каждого узла и общей сборки, а также календарные графики сборки. Это позволяет рационально использовать сборочное оборудование и рабочую силу и тем самым ускорить процессы сборки.

Для применения унифицированных технологий на этапе ТПП важное значение должно быть отведено созданию каталогов применяемости технологической оснастки (штампы, кондукторы, специальные приспособления и УСП, наладки к ним, мерительный и контрольный инструмент: пробки гладкие, резьбовые и шлицевые; скобы для проверки наружных размеров; специальные контрольные приспособления и т.п.), специального инструмента, комплектов инструментов (например, в виде переносимых применяемых наборов инструмента). В САПР Т (рисунок) эти каталоги могут быть выполнены в виде соответствующих баз данных. Для работы в САПР Т вся

информация кодируется в соответствии с принятой на предприятии системой кодирования. В соответствии с этой системой должны быть разработаны классификаторы: материалов (КМ на рисунке), режущего и мерительного инструмента, станочных и контрольных приспособлений, оборудования. В состав технологического классификатора могут входить также классификаторы технологических переходов и операций, а также классификатор средств индивидуальной защиты (очки защитные, рабочий костюм, перчатки и т.п.) и соответствующих инструкций по охране труда (на рисунке не показаны).

Литература: 1. Сборка и монтаж изделий машиностроения: Справочник. В 2-х т. Т.1. Сборка изделий машиностроения / Под ред. В.С.Корсакова, В.К.Замятина, 1983. – 480 с. 2. Ларшин В.П. Интегрированные технологические системы в машиностроении. // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 1999. – Вып. 3(9). – С. 55-58. 3. Ларшин В.П. Интегрированные производственные системы в машиностроении // Сучасне машинобудування. – 2000. – № 1-2(3-4). – С.141-147. 4. Ларшин В.П., Челиканов Г.М. Интегрирование машиностроительного производства на основе групповой технологии // Научно-технические проблемы станкостроения, производства технологической оснастки и инструмента: Мат.международ.конф.–К.: АТМ Украины, 2002.– С.70-72.

УДК 621.922.04

ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ НА ТОЧНОСТЬ МЕХАНООБРАБОТКИ

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

In work the analysis of influence of methods of formation of forms on accuracy of machining is lead.

Проблема обеспечения точности обработки деталей на металлорежущих станках связана с решением комплекса задач, направленных на поиск резервов повышения качества изделий в машиностроении. Рассмотрим основные факторы, определяющие погрешность обработки деталей.

Погрешность установки заготовки.

Погрешность металлорежущего станка (кинематическая и динамическая).

Погрешность настройки оборудования и инструмента.

Износ режущего инструмента.

Температурные деформации технологической системы.

В частности, погрешности, образованные настройкой оборудования и инструмента, а также установки заготовки приводят к существенному снижению точности обработки поверхности.

С точки зрения влияния погрешности обработки на работоспособность технологической системы можно выделить влияние параметра технологического режима обработки на надежность процесса. В этой связи целесообразно обратить внимание на методы формообразования, такие, как: метод следа; метод касания; метод копирования; метод обкатки. Любая поверхность обрабатываемой детали, идеальная и реальная, может быть представлена в виде направляющей и образующей линий, каждая из которых может быть создана одним из известных методов. Можно предположить, что сочетание методов, по существу, является характеристикой способности того или иного способа обработки заготовки обеспечить требуемые показатели точности. Это утверждение требует более подробного рассмотрения.

В общем случае для образования поверхности число движений формообразования равно сумме необходимых для образования каждой из производящих линий. С

учетом числа совмещенных (повторяющихся) движений их число может быть представлено следующей зависимостью:

$$H_{\phi} = H_o + H_n - 0,5H_c,$$

где H_{ϕ} – общее число формообразующих движений; H_o – число движений для получения образующей линии; H_n – число движений для получения направляющей линии; H_c – число совмещенных движений.

Количество и взаимосвязь движений формообразования, необходимых для образования реальной поверхности, являются одним из определяющих факторов кинематической структуры металлорежущего станка, что, несомненно, связано с возможностью и степенью влияния вида погрешности на точность обработки.

Образующая реальной поверхности осуществляется основным движением резания, а направляющая формируется подачей обрабатывающего инструмента. Поскольку формообразующие движения являются основой кинематики металлорежущего станка – кинематическая схема станка в значительной мере определяет его компоновку. Компоновочные особенности металлорежущего станка определяют особенности его технологического оснащения. Все это в комплексе дает основания полагать, что именно формообразующие движения являются первичным признаком, характеризующим возможности достижения требуемой точности обработки деталей (табл. 1). Высказанные замечания имеют особое значение для изделий, требующих сложного формообразующего движения. При этом, очевидно, возникает перспектива на основе анализа формообразования обрабатываемой поверхности разрабатывать технологию их обработки.

Таблица 1

Примеры применения методов формообразования

метод формообразования: образующей (строка) и направляющей (столбец)				
	след	касание	копирование	обкатка
копирование	Метод реализуется при нарезании резьбы с помощью резьбового резца	Метод реализуется при фрезеровании резьбы дисковой фрезой	Метод реализуется при объемной штамповке. Резание со снятием стружки невозможно	Метод реализуется при накатывании поверхности роликом с целью повышения ее износостойкости

Ряд поверхностей деталей обладает свойством обратимости, позволяющим менять назначение производящих линий. Нередко такие поверхности являются более технологичными, так как увеличивают число возможных способов их получения. Выбор производящих линий и метода обработки должен осуществляться исходя из следующих основных принципов: простое получение точной образующей; производительное резание вдоль направляющей; простая структура металлорежущего станка. Однако необходимо создание методики, которая позволяла бы на основе количественных характеристик осуществлять соответствующий синтез технологических операций обработки заготовок. На рис. 1 представлена схема, отражающая связи факторов формообразования и показателей качества и эффективности обработки деталей при формировании технологической операции.

Проиллюстрируем это на примере обработки цилиндрической поверхности детали. Очевидно, что показателем точности обработки является погрешность диаметра цилиндрической поверхности. Если направляющая реальной поверхности есть

прямая линия, а образующая - окружность, то влияние износа инструмента на образующую значительно ниже, чем на направляющую. Примем износ J инструмента с интенсивностью:

$$J = \frac{h_{max}}{L},$$

где h_{max} – максимальный износ инструмента; L – максимальный путь резания.

Тогда влияние износа инструмента на погрешность направляющей δ_n при токарной обработке будет определяться известным выражением:

$$\delta_n = \pi \cdot D \cdot J \cdot \frac{l_n \cdot n}{S_n}$$

где D – диаметр цилиндрической поверхности, мм; l_n – длина направляющей, мм; n – частота вращения шпинделя станка при обработке поверхности, об/мин; S_n – подача инструмента вдоль направляющей, мм/мин.

Влияние износа инструмента на погрешность направляющей δ_0 при токарной обработке будет определяться следующим выражением:

$$\delta_0 = \pi \cdot D \cdot J.$$



Рис. 1. Схема связи факторов формообразования и показателей качества и эффективности обработки деталей при формировании технологической операции.

Введем понятие о коэффициенте погрешности формообразования K_ϕ , который может быть определен из следующего выражения:

$$K_\phi = \frac{\delta_0}{\delta_n}.$$

Для рассмотренного примера этот коэффициент имеет следующий вид:

$$K_\phi = \frac{S_n}{l_n \cdot n}.$$

Этот показатель принимает значения в интервале от 1 до асимптотического приближения к 0. Можно видеть, что в том случае, если K_ϕ близок к 1, то метод формообразования не создает дополнительных трудностей в достижении точности обработки. Когда же этот коэффициент мал, тогда необходимо обеспечивать дополнительные технологические мероприятия, в том числе принимать меры к разработке специальной технологической оснастки.

Рассмотрим значения K_ϕ на примере токарной обработки деталей длиной от 50 до 500 мм и подачами на оборот детали (S_n / n) от 0,1 до 3,0 с шагом 0,2 (выполнено в среде MathCAD):

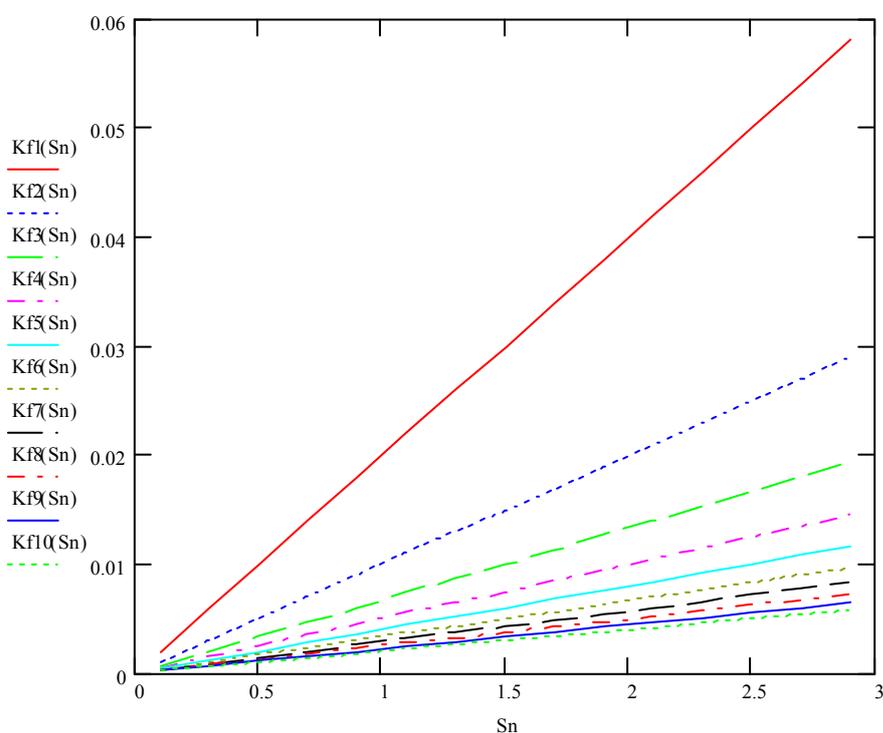
$$S_n := 0.1, 0.3.. 3$$

$$l_1 := 50 \quad l_2 := 100 \quad l_3 := 150 \quad l_4 := 200 \quad l_5 := 250 \quad l_6 := 300$$

$$l_7 := 350 \quad l_8 := 400 \quad l_9 := 450 \quad l_{10} := 500$$

$$K_{f1}(S_n) := \frac{S_n}{l_1} \quad K_{f2}(S_n) := \frac{S_n}{l_2} \quad K_{f3}(S_n) := \frac{S_n}{l_3} \quad K_{f4}(S_n) := \frac{S_n}{l_4} \quad K_{f5}(S_n) := \frac{S_n}{l_5}$$

$$K_{f6}(S_n) := \frac{S_n}{l_6} \quad K_{f7}(S_n) := \frac{S_n}{l_7} \quad K_{f8}(S_n) := \frac{S_n}{l_8} \quad K_{f9}(S_n) := \frac{S_n}{l_9} \quad K_{f10}(S_n) := \frac{S_n}{l_{10}}$$



Таким образом, значения коэффициента K_ϕ для токарной обработки оказались значительно меньше единицы, что подтверждает необходимость тщательной технологической подготовки производства или выбора альтернативных методов формообразования.

К основным методам получения плоских поверхностей можно отнести: фрезерование торцовое и периферийное, строгание, шлифование торцовое и периферийное, протягивание, торцевое точение.

При фрезеровании поверхности периферией фрезы образующая линия получается методом копирования, а направляющая - методом касания. В результате коэффициент погрешности формообразования будет равен отношению износа инструмента образующей к износу инструмента направляющей:

$$\delta_n = S \cdot n_\phi \cdot J \cdot k \cdot \frac{l_\phi}{n_z}, \quad \delta_0 = S \cdot n_\phi \cdot J \cdot \frac{l_\phi}{n_z},$$

где k – число проходов фрезы; S – подача фрезы на зуб; n_ϕ – число оборотов фрезы; J – интенсивность износа фрезы; l_ϕ – длина образующей фрезерования; n_z – число зубьев фрезы.

В результате для плоского фрезерования коэффициент погрешности формообразования K_ϕ равен $1/k$. То есть, чем больше число проходов, тем меньше коэффициент K_ϕ , что указывает на целесообразность создания специальных технологи-

ческих приемов механообработки.

Как видно из определения коэффициента K_ϕ , он может быть вычислен по отношению к различным факторам погрешности обработки (выше было показано значение K_ϕ применительно к износу инструмента). Можно предполагать, что общий показатель, характеризующий взаимосвязь метода формообразования и погрешности обработки может быть представлена следующей формулой:

$$K_{\phi\Sigma} = \sqrt{\sum_m (\lambda_i^2 \cdot K_{\phi_i}^2)},$$

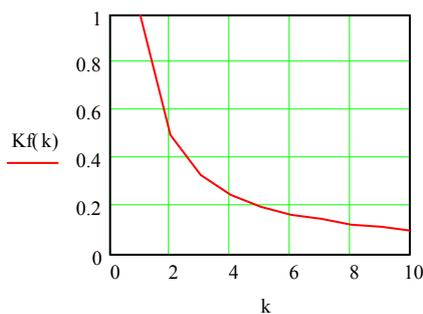
где λ_i – эмпирический весовой коэффициент; K_{ϕ_i} – коэффициент погрешности формообразования по i -тому фактору.

Общий смысл $K_{\phi\Sigma}$ состоит в том, что увеличение его значения свидетельствует о повышении точности обработки, а снижение потребует дополнительной технологической подготовки и более детальной разработки технологической операции в целом или переработки ее содержания. Это становится наиболее актуальным при дифференциации операций. Действительно, в массовом и крупносерийном производствах выбор метода формообразования может явиться одним из наиболее эффективных путей повышения точности изготовления деталей.

Пофакторный и комплексный анализ коэффициента K_ϕ позволяет разрабатывать технологические методы повышения точности обработки деталей. Необходимо отметить, что в подавляющем большинстве случаев наибольший вклад в величину K_ϕ будет осуществлять фактор базирования заготовки. Безусловно, учет влияния погрешности базирования на формирование погрешности обработки должен производиться с учетом формообразования. Особенно важно это для сложных поверхностей и для автоматных операций. До настоящего времени не существовала обобщающая методика синтеза технологической операции на основе такого комплексного анализа. Целесообразность же создания такой методики имеет место там, где следу-

$$k := 1..10$$

$$Kf(k) := \frac{1}{k}$$



ет проектировать технологическое оснащение, т.е. в серийном и массовом производствах.

Изложенный выше подход к количественной оценке погрешности формообразования позволяет развить общую методологию анализа факторов погрешности обработки на основе теории формообразования и обеспечить теоретическое обоснование новых технологических решений.

УДК 629.113

ПОЛИГОН ДЛЯ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НАГРУЖЕННОСТИ ПРИЦЕПОВ

Дашенко А.Ф., докт. техн. наук, **Бажанов А.И.,** **Панкратов Н.М.,** **Котов О.В.**
(г. Одесса, Украина)

The range for researches of trailers of mobile machines is described.

Наличие информации о нагруженности машин существенно сокращает время их доводки и постановки на производство. Особенно актуальна данная проблема применительно к оценке нагруженности мобильных машин. Это обусловлено тем, что эксплуатационное нагружение мобильных машин носит случайный характер, имеющий сложные структуры, оценка которых возможна только экспериментальным путем [1...2].

На стадии проектирования мобильных машин (в дальнейшем машин) информации об их переменной нагруженности обычно бывает недостаточно. Переменную нагруженность первых образцов машин оценивают в основном методом тензометрических исследований в типичных условиях эксплуатации. Машины обычно исследуются на специальных стационарных полигонах, где имеются типичные участки дорог и сложная тензометрическая аппаратура. Данная метода достаточно апробирована в разных странах мира, в том числе и в Украине [2]. Однако реализация ее требует значительных капитальных вложений, которые окупаются в течение десятилетий.

Применительно к нуждам заводов, выпускающих прицепы небольшой грузоподъемности, данная проблема может быть решена путем применения методических разработок, изложенных в этой статье.

Экономически целесообразно и методически корректно эта проблема может быть решена применением трех мобильных установок: мотора-редуктора с водилом 3, электростанции и тензометрической аппаратуры. Мотор-редуктор (МР) 1 (см. рисунок) монтируется на прицепе 2, имеющем устройства 9 для нивелирования и тягово-сцепные устройства (ТСУ) 15 для фиксации испытуемых автотранспортных средств (АТС), в данном случае прицепов. В верхней части МР расположено устройство, которое с помощью водила 3 приводит в движение прицеп 17. В центре устройства неподвижно закреплена телескопическая штата 10, внутри которой проходят кабели 11 электропитания МР и тензометрической аппаратуры. Мобильный источник электроэнергии — это передвижная электростанция 12, смонтированная на прицепе 13, оборудованном дизель-генераторной установкой. К борту прицепа 13 закреплена телескопическая штанга 14, предназначенная для передачи электроэнергии через кабель к штате 10 МР.

Водило МР представляет собой жесткую телескопическую штангу трубчатого сечения, на конце которой закреплено опорное колесо 6. Рядом с опорным колесом

крепится стойка-имитатор ТСУ 8 автомобиля-тягача, буксирный шар ТСУ 15, в случае необходимости, можно установить на различном расстоянии от МР. Движение прицепа осуществляется в любом из направлений. Во время проведения исследований одновременно имеется возможность испытывать все навесное электрооборудование прицепов.

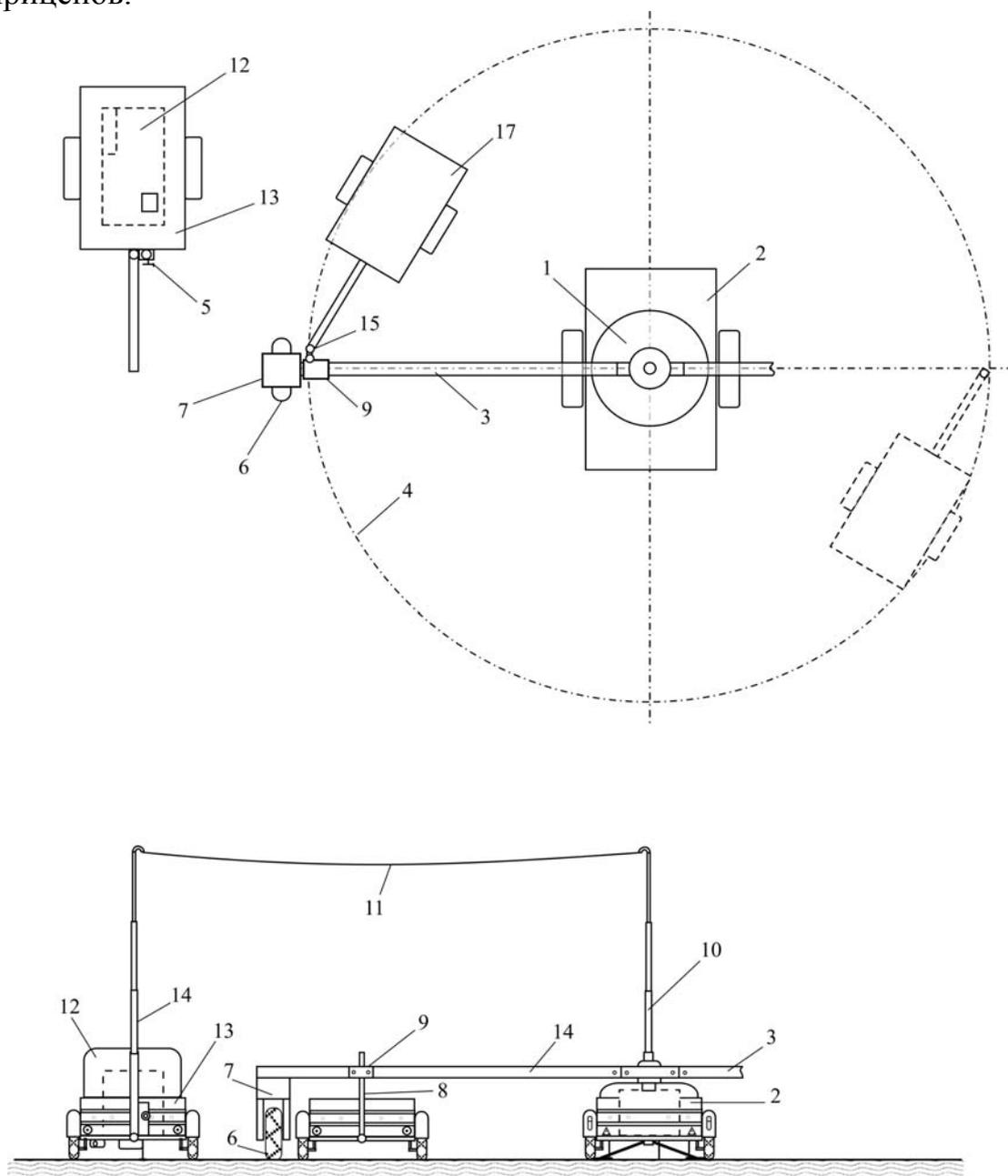


Рисунок. Мотор-редуктор: 1 - мотор-редуктор; 2 - прицеп мотора-редуктора; 3 - водило; 4 - траектория движения испытываемых прицепов; 5 - подъемник телескопической штанги электростанции; 6 - колесо; 7 - вилка; 8 - стойка; 9 - нивелир; 10 - телескопическая штанга мотора-редуктора; 11 - кабель; 12 - дизель-генератор; 13 - прицеп электростанции; 14 - штанга электростанции; 15 - шар ТСУ.

Для съема информации о нагруженности на прицепе устанавливаются тензопреобразователи, датчики ускорений, датчики сил и другое оборудование рекомендованное [1, 2].

Согласно техническому заданию определяют типичные условия эксплуатации и принятые решения о нагружении прицепов.

На основе различных сочетаний режимов нагружения и продолжительности их

действия образуются варианты использования прицепа [1].

С учетом этой концепции подбирают участки дорог с типичными микро- и макропрофилями. Затем устанавливают мобильное оборудование и проводят тензометрические исследования нагруженности. Продолжительность записей процесса нагруженности определяют исходя из рекомендаций изложенных [1].

Расчет долговечности по результатам тензометрических исследований целесообразно выполнять на основе гипотезы линейного суммирования повреждений Палигрена-Мейера. Учитывая, что для мобильных машин измерения амплитуды полных циклов переменных напряжений лучше всего описываются двухпараметрическим распределением Вейбула [2], расчет долговечности (T) представляется целесообразным выполнять по формуле [2]:

$$T = \frac{N_0 \sigma_{-lg}^m}{h_0 \Gamma\left(\frac{n}{2}\right) a^m},$$

где N_0 - параметр степенного уравнения кривой усталости; σ_{-lg} - предел выносливости металлоконструкции; h_0 - среднее число циклов в единицу времени; $\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)$ - Гамма-функция; a - коэффициент, равный отношению значения нижней границы суммирования повреждений к пределу выносливости σ_{-lg} .

Применение изложенного в статье метода и оборудования позволяет значительно сократить время и затраты, необходимые для оценки нагруженности и ресурса за счет сокращения затрат на создание различных типичных участков дорог и применения кабельного способа передачи информации с объекта исследования на регистрирующее устройство, которое, по сравнению с радиотелеметрическим, на порядок дешевле.

Конструктивно-методические разработки апробирования предложены институту - полигону мобильной техники (ИНПОМТ).

Таким образом, изложенные в статье предложения могут найти применения на заводах-изготовителях при создании прицепов и другой мобильной техники.

Литература: 1. Дмитриченко С.С. Анализ нагруженности элементов машин. — М.: Машиностроение, 1977. 2. Панкратов Н.М., Боровский Н.Д. Ускоренные испытания мобильных машин и их элементов, Одесса, Черноморье, 1998.

УДК 658. 52.011

КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Макурин Н.С., канд. техн. наук, **Королева Я.Ю.** (г. Харьков, Украина)

The technique of an estimation of efficiency of industrial technological system is considered {examined} on the basis of factor of organizational - technical use of the equipment.

Одним из аспектов, предопределяющим снижение экономической эффективности производственных технологических систем (ПТС), является их неопределенность в организационно-информационной структуре реального производства. Следует иметь ввиду, что ПТС – это не просто набор автоматически функционирующего оборудования, а, как правило, новая организационно-информационная форма

производственной структуры, эффективность которой зависит от общего организационно-технического уровня всего производства. Поэтому создание локальных ПТС позволит решить некоторые задачи частного характера, однако полученный эффект от их внедрения также будет только локальным (например, повышение производительности отдельных операций, снижение численности производственных рабочих и т.д.). Однако в этом случае должны быть заранее определены именно локальные цели создания такой ПТС и соответствующие локальные критерии эффективности.

В общем плане целью создания ПТС является максимизация времени работы технологического оборудования в условиях изменяющегося многономенклатурного производства. Критерий оценки эффективности системы, приемлемый для её получения, должен отвечать поставленной цели. Однако прежде чем перейти к рассмотрению собственно критерия оценки, целесообразно определить требования, предъявляемые к выбору и методам его оценки. Критерий оценки эффективности ПТС должен отражать особенности и свойства системы в техническом, технико-экономическом и экономическом аспектах.

Автоматизация процесса проектирования ПТС накладывает ряд требований к выбору вида критерия. Он должен легко подаваться формализации, не быть субъективным, обеспечивать сопоставимость оценок, функционально связывать техническую оценку ПТС с факторами, влияющими на экономическую эффективность.

Критерий должен также позволять управлять процессом проектирования, определять условия эффективного применения различных средств и величину экономического эффекта. Методы расчёта критерия должны позволять использовать вычислительную технику, обеспечивать возможность варьирования параметров и достижения необходимой степени точности.

По целому ряду условий этим требованиям отвечает рассмотренный коэффициент организационно-технического использования ($K_{o.m.u}$) ПТС, характеризующий степень использования технологического оборудования, т.е.

$$K_{o.m.u} = \frac{1}{\sum_{a=1}^4 B_a} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где B_a - потери времени по a -му оборудованию.

Однако выбранная по этому критерию структура не всегда может быть оптимальна по экономичности, т.е. не всегда может соответствовать минимуму приведенных затрат. Из приведенной зависимости (1) следует, что при неизменной и постоянной технологии изготовления изделий коэффициент $K_{o.m.u}$ можно приблизить к единице, т.е. теоретически любую систему можно создать с таким уровнем автоматизации, при котором все функции, выполняемые человеком, можно передать машинам. Однако возрастание $K_{o.m.u}$ и соответствующие преимущества от его увеличения не будут адекватны затратам на реализацию.

Так, на практике снижение себестоимости на 1% за счёт повышения использования оборудования не всегда соответствует расходам на дополнительные устройства, обеспечивающие это снижение. В практике машиностроения имеется достаточно большое количество примеров, когда переход на достаточно высокий уровень автоматизации не только не давал экономического эффекта, но и приводил к удорожанию производства за счет роста амортизационных отчислений. Поэтому увеличе-

ние коэффициента организационно-технического использования за счёт создания системы обеспечения функционирования ПТС должно быть соизмеримо с весомостью затрат на реализацию этого приращения.

Затраты на оборудование ПТС, реализующие ряд операций, направленных на снижение потерь времени, являются функцией $K_{o.m.u}$. В то же время предельная величина этого коэффициента равна единице, причём его значение в определённых пределах связано с уровнем совершенства технологии и оборудования, а дальнейший рост зависит от систем, входящих в состав системы обеспечения функционирования ПТС. Пусть скорость роста $K_{o.m.u}$ пропорциональна произведению величины, характеризующей текущий уровень, на разность между предельным (максимальным) и текущим значением этого уровня. В этом случае математическая модель может быть описана уравнением

$$\frac{dK_{o.m.u}}{dZ} = \frac{aK_{o.m.u}(K_{np} - K_{o.m.u})}{K_{np}}, \quad (2)$$

где Z - величина затрат; a - коэффициент пропорциональности; K_{np} - предельный (максимальный) уровень значения коэффициента организационно-технического использования.

Приравняв $a / K_{np} = b$, получим

$$\frac{dK_{o.m.u}}{dZ} = bK_{o.m.u} \left(\frac{a}{b} - K_{o.m.u} \right) \quad \text{или} \quad \frac{dK_{o.m.u}}{dZ} = aK_{o.m.u} - bK_{o.m.u}^2.$$

$$\text{Отсюда} \quad dZ = \frac{dK_{o.m.u}}{aK_{o.m.u} - bK_{o.m.u}^2}.$$

Указанное уравнение отражает динамику, при которой темп прироста $K_{o.m.u}$ падает с ростом его величины.

Интегрируя, получим

$$Z = - \int_0^1 \frac{dK_{o.m.u}}{aK_{o.m.u} - bK_{o.m.u}^2} = - \int_0^1 \frac{dK_{o.m.u}}{K_{o.m.u} [(-a) + bK_{o.m.u}]}; \quad Z = - \frac{1}{a} \ln \left(\frac{bK_{o.m.u} - a}{K_{o.m.u}} \right) + C, \quad (3)$$

где C □ постоянная интегрирования.

При $Z=0$ величина $K_{o.m.u}$ соответствует начальному уровню, т.е. использованию автономно работающего оборудования (коэффициент $K_{o.m.u}^{a.c}$). При $Z=0$

$$\ln \left(\frac{bK_{o.m.u} - a}{K_{o.m.u}} \right) = 0, \quad \text{т.е.} \quad \frac{aK_{o.m.u}^{a.c} - a}{K_{o.m.u}^{a.c}} = 1, \quad \text{откуда}$$

$$a = \frac{K_{o.m.u}^{a.c}}{K_{o.m.u}^{a.c} - 1}. \quad (4)$$

Подставляя значение a в уравнение (3), получим при $K=1$

$$Z = \frac{1 - K_{o.m.u}^{a.c}}{K_{o.m.u}^{a.c}} \ln \left[\frac{bK_{o.m.u} \left(\frac{1 - K_{o.m.u}^{a.c}}{K_{o.m.u}^{a.c}} \right)}{K_{o.m.u}} \right]^{-1} = \frac{1 - K_{o.m.u}^{a.c}}{K_{o.m.u}^{a.c}} \ln 0 = \infty.$$

Таким образом, при достижении $K_{o.m.u}$ максимального значения, равного единице, затраты на реализацию будут стремиться к бесконечности. Отсюда следует, что $b < 0$, т.е. при всех возможных вариантах величина потерь времени не будет равна нулю. Графически эта функция представлена кривой I на рис. 1.

Повышение уровня использования технологического оборудования по времени, реализуемое при повышении $K_{o.m.u}$, снижает стоимость одного станко-часа работы оборудования, которая для многоцелевого оборудования составляет 6...9 грн. (стоимость одного станко-часа универсальных станков – 3...5 грн.) Стоимость одного станко-часа, зависящая от величины фонда рабочего времени, может быть определена из выражения

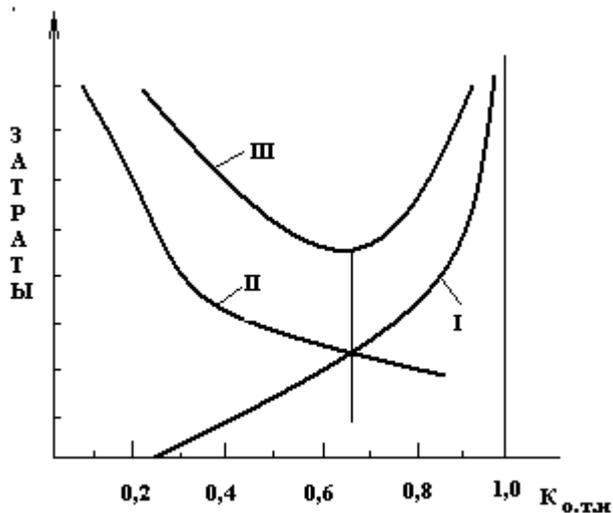


Рис. 1. График зависимости затрат на создание системы обеспечения функционирования ПТС от величины $K_{o.m.u}$.

$$Z_{\text{станко-ч}} = \frac{BP}{\Phi K_{o.m.u}} + EB, \quad (5)$$

где B – балансовая стоимость станка; P – коэффициент реновации, равный обратному значению срока службы оборудования; E – нормативный коэффициент окупаемости капиталовложений.

Полученная зависимость (рис.1, кривая II) имеет вид гиперболы, характеризуемой уменьшением величины затрат (стоимости) на один станко-час при увеличении коэффициента $K_{o.m.u}$. Однако темп снижения $K_{o.m.u}$ по мере увеличения его значения замедляется. Наличие одновременно действующих тенденций (по мере повышения затрат увеличивается $K_{o.m.u}$, причём рост коэффициента уменьшается после достижения им определённой величины и одновременно замедляется темп снижения стоимости одного станко-часа) приводит к увеличению издержек производства при достижении определённых величин коэффициента $K_{o.m.u}$ (кривая III на рис.1). Таким образом, величина денежных затрат, зависящая от достигнутого значения коэффициента $K_{o.m.u}$, изменяется непропорционально ему, т.к. на $K_{o.m.u}$ одновременно воздействуют различные по своему характеру факторы.

Суммарные производственные затраты

$$Z_{\Sigma} = -\frac{1}{a} \ln \left(\frac{bK_{o.m.u} - a}{K_{o.m.u}} \right) + \frac{BP}{\Phi K_{o.m.u}} + EB. \quad (6)$$

Из графика соотношения затрат (рис. 1) можно сделать вывод, что функция общих затрат – это непрерывная выпуклая вниз функция. Поскольку интерес представляет точка, в которой функция достигает минимума, нужно произвести следующие действия: найти первую производную функции Z по $K_{o.m.u}$

$$\frac{dZ_{\Sigma}}{dK_{o.m.u}} = \frac{1}{aK_{o.m.u} - bK_{o.m.u}^2} - \frac{BP}{\Phi K_{o.m.u}^2},$$

приравнять её к нулю и найти $K_{o.m.u}$ из уравнения

$$\frac{1}{aK_{o.m.u} - bK_{o.m.u}^2} - \frac{BP}{\Phi K_{o.m.u}^2} = 0.$$

Обозначим $\frac{BP}{\Phi} = m$, и тогда

$$\frac{K_{o.m.u}^2 - m(aK_{o.m.u} - bK_{o.m.u}^2)}{K_{o.m.u}^2 (aK_{o.m.u} - bK_{o.m.u}^2)} = 0; \quad K_{o.m.u}^2 - amK_{o.m.u} + bmK_{o.m.u}^2 = 0, \quad K_{o.m.u}^{onm} = \frac{am}{am + 1},$$

где $K_{o.m.u}^{onm}$ - оптимальное значение коэффициента организационно-технического использования.

Учитывая, что

$$a = \frac{K_{o.m.u}^{a.c}}{K_{o.m.u}^{a.c} - 1},$$

$$K_{o.m.u}^{onm} = \frac{1}{1 + \frac{1}{am}} = \frac{1}{1 + \frac{K_{o.m.u}^{a.c} - 1}{K_{o.m.u}^{a.c} m}} = \frac{K_{o.m.u}^{a.c} m}{K_{o.m.u}^{a.c} (m + 1) - 1}. \quad (7)$$

Таким образом, $K_{o.m.u}$ имеет свой оптимум и, следовательно, имеется оптимальный уровень затрат на систему обеспечения функционирования ПТС. С помощью полученных зависимостей можно определить оптимальную величину этого коэффициента при ограниченных материальных ресурсах и, следовательно, систему (или системы), входящую в состав системы обеспечения функционирования ПТС, которая позволяет реализовать это значение.

Литература: 1. Ашманов С.А. и др. Теория оптимизации в задачах и упражнениях. □ М.: Наука, 1991. □ 446 с. 2. Лищинский Л.Ю. и др. Структурный и параметрический анализ гибких производственных систем. □ М.: Машиностроение, 1990. □ 312 с. 3. Технологические основы ГПС /В.А. Медведев и др. Под ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Машиностроение. 1991. □ 240 с. 4. Многоканальные системы оптимального управления /Е.Е. Александров, Б.И. Кузнецов и др. – К.: Техніка, 1995. □ 288 с.

УДК 621.923

ОБОСНОВАНИЕ СВЯЗИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТООТРАЖАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ШТАНГ С ОТВЕРСТИЯМИ С ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ

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

In clause the estimation of operating conditions of a bar with apertures under influence of a stream of falling energy is resulted.

Известно [1], что работоспособность поверхностей тонких упругих лент штанг в условиях воздействия светового потока в значительной степени определяется их геометрическими и физико-химическими характеристиками. Уменьшить температуру нагрева деталей, работающих в условиях воздействия светового потока, можно за счет технологического обеспечения заданных геометрических и оптических характеристик поверхностей, применяя для этого эффективные методы механической и физико-технической обработки. Однако, в настоящее время отсутствуют практические рекомендации по технологическому обеспечению геометрических и оптических характеристик поверхностей труднообрабатываемых особотонкостенных деталей.

Для обоснования влияния геометрических характеристик поверхностей штанг на температурный перепад освещенной и теневой стороны, приводящий к их изгибу, сделаем следующие допущения [1]:

- нагрев штанги происходит за счёт теплового потока, идущего от излучателя;
- толщина стенок весьма мала в сравнении с расстоянием между ними (диаметр сечения $2,4 \cdot 10^{-2}$ м), температура не меняется по толщине стенок;
- зазор в месте перехлёста кромок штанги мал, его величина приблизительно равна толщине стенки сечения. Лучистый теплообмен между поверхностями в этой области происходит по закону для двух бесконечных параллельных плоскостей. Среднюю линию сечения можно с достаточной степенью точности считать окружностью с постоянным радиусом;
- распределение температуры в сечениях штанги по длине одинаково. Влияние природы материала и концов стенок не учитываем;
- физические величины λ , c и ρ (коэффициент теплопроводности, теплоёмкости и плотности материала штанги) будем считать постоянными и независимыми от координат и температуры (материал однороден и температурный интервал сравнительно невелик).

Ввиду симметричности сечения, достаточно рассмотреть направление теплового потока при изменении угла θ от 0 до π и угла α от 0 до $\frac{\pi}{2}$ (рис.1).

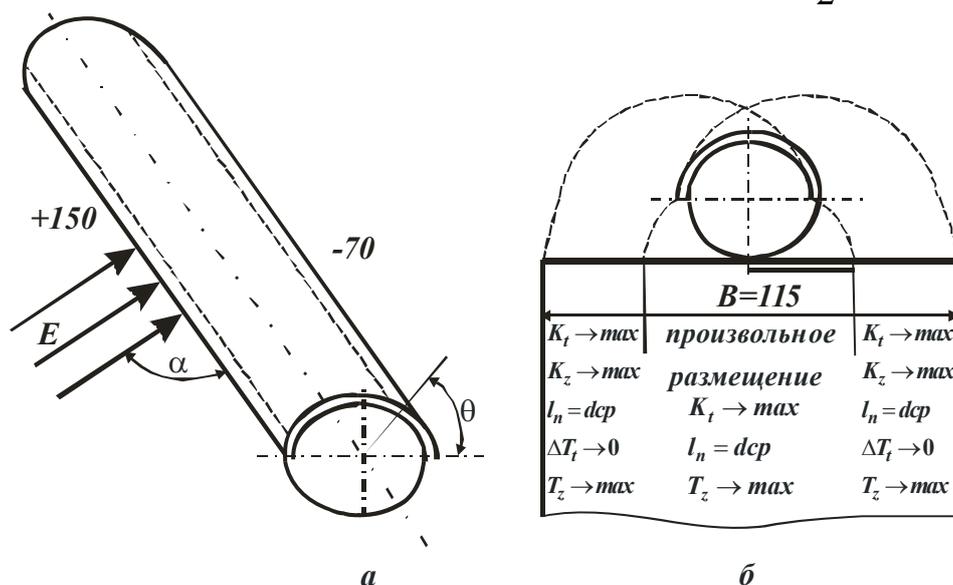


Рис. 1. Направление светового потока (а) и развёртка сечения (б) штанги с условиями размещения отверстий.

Очевидно, что $\max(T_2 - T_1)$ будет при $\theta = \frac{\pi}{2}$ и $\alpha = \frac{\pi}{2}$.

Необходимо, решить следующую задачу: оценить максимальную разность температур и свести её к минимальной:

$$\max(T_2 - T_1) \rightarrow \min_{\theta, \alpha} \quad (1)$$

Как известно [1], нестационарное температурное поле будет описываться одномерным уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2}, \quad (2)$$

где T – текущая температура в произвольной точке; τ – время течения процесса; θ – текущая координата; $\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ – коэффициент температуропроводности материала

стенки штанги.

Применительно к сечению штанги интенсивность теплового потока внутри материала стенки можно представить в следующем виде [2]:

$$q_1 = \frac{4\lambda t}{D^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2}. \quad (3)$$

Интенсивность теплового потока на поверхности штанги:

$$q_2 = Enad \cdot As \cdot \frac{F_N}{F_{uu}} \cdot \cos \alpha = Enad \cdot As \cdot \frac{F_N}{F_\Gamma} \cdot F \cdot \cos \alpha, \quad (4)$$

где $F_N = D \cdot \Delta \ell$, $F_\Gamma = \frac{\pi D}{2} \Delta \ell$ – проекция облучаемой поверхности на плоскость, нормальную к падающему излучению и облучаемая гладкая поверхность соответственно.

В начальной точке интенсивность тепловых потоков будет равна, т.е. $q_1 = q_2$:

$$\frac{2}{\pi} \cdot F \cdot Enad \cdot As \cdot \cos \alpha = \frac{4\lambda t}{D^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2}. \quad (5)$$

Из уравнения (5) следует, что, изменяя шероховатость поверхности, можно в определённой степени изменять температуру на поверхности штанги (левая часть уравнения). На эффект передачи части поглощаемой энергии на противоположную

сторону сечения штанги можно также воздействовать изменением размеров диаметра D и толщины материала t штанги, а также путём выбора материала (правая часть уравнения).

Таким образом, интенсивность изменения температуры (в пространственных координатах) зависит от геометрических размеров сечения штанги, шероховатости поверхности и природы материала:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} = \frac{D^2 \cdot F}{2\pi\lambda t} \cdot Enad \cdot As \cdot \cos \alpha. \quad (6)$$

По интенсивности изменения температуры можно оценить максимальный температурный дифференциал:

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} \Big|_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} = \frac{D^2 F}{2\lambda t} \cdot Enad \cdot As \cdot \cos \alpha. \quad (7)$$

При значении фактора шероховатости $F = 0,5$ уравнение (7) согласуется с данными, приведенными в работе [5].

Деформация изгиба штанги под воздействием теплового потока в этой работе

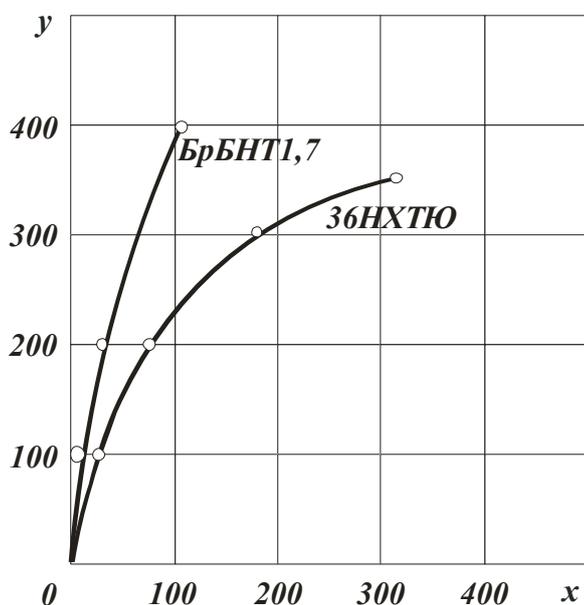


Рис. 2. Зависимость прогиба штанги от ее длины для штанг из сплава марки: 1 – БрБНТ 1,7; 2 – 36НХТЮ.

аппроксимируется следующим уравнением:

$$x = \frac{D}{\Delta T \alpha_\ell} \ln \cos \frac{\Delta T \alpha_\ell}{D} y, \quad (8)$$

где α_ℓ - коэффициент теплового линейного расширения.

На рис. 2 представлена зависимость изгиба штанги x от её длины y . Расчет выполнен по уравнению (8).

Следует отметить, что изгиб штанг из ленты сплава марки БрБНТ 1,7 значительно меньше. В значительной степени величина изгиба зависит от поглощательной способности поверхности и других теплофизических величин материала λ и α_ℓ .

Для расчёта теплового изгиба использованы следующие значения входящих в формулу теплофизических величин [4]:

- БрБНТ1, 7 $\lambda = 200$ Вт/м·град; $\alpha_\ell = 15,8 \cdot 10^{-6}$ 1/град;
 - З6НХТЮ $\lambda = 35$ Вт/м·град; $\alpha_\ell = 9,8 \cdot 10^{-6}$ 1/град;
- $D = 0,024$ м; $t = 0,00015$ м; $E_{пад} = 1550$ Вт/м²; $\alpha = 0$.

Рассмотрим поведение трубчатого элемента штанги с отверстиями.

Сечение штанги можно рассматривать как сечение, состоящее из трёх участков (рис. 3.), находящихся в различных условиях теплообмена I ($0 < \theta < \pi$), II ($\pi < \theta < 2\pi$) и III ($0 \leq \theta \leq \pi$).

Для каждого участка найдём уравнение, связывающее температуры T_I , T_{II} и T_{III} при значениях $\theta = \frac{\pi}{2}$ и $\frac{3}{2}\pi$ (худшие случаи воздействия теплового потока). Эти уравнения можно получить из условия теплового баланса трёх участков сечения стержня.

Тепловой баланс на стенке можно представить в виде уравнения [3]:

$$A_s \cdot E \cdot S_N = \varepsilon \cdot C_o \cdot S \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

где A_s - коэффициент поглощения лучистой энергии поверхностью стенки; E - плотность падающего солнечного лучистого потока, Вт/м²; S_N - проекция облучаемой поверхности стенки на плоскость, нормальную к падающему излучению, м²; ε - коэффициент излучения поверхности стенки (степень черноты); C_o - постоянная Стефана-Больцмана 5,67 Вт/м²·К⁴; S - излучаемая поверхность стенки, м²; T - температура стенки.

Анализ уравнения показывает, что отношение доли поглощения к излучению поверхностей будет зависеть от шероховатости излучаемой поверхности, площадь которой должна быть значительно больше, чем площадь воспринимающей падающий лучистый поток поверхности.

$$\frac{A_s}{\varepsilon} = \frac{C_o}{E} \cdot \frac{S}{S_N} \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4.$$

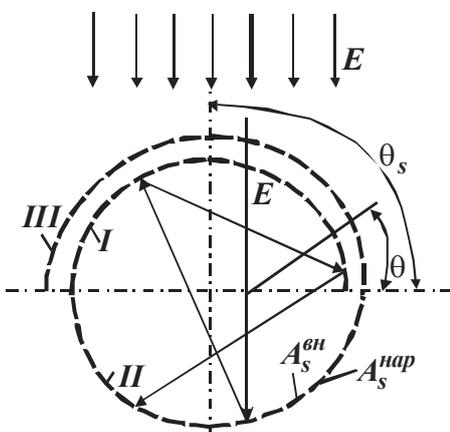


Рис. 3. Схема перераспределения лучистого потока E по сечению штанги с отверстиями.

Это отношение прямо пропорционально отношению общей площади излучения S к площади проекции облучаемой поверхности S_N . С увеличением шероховатости поверхности площадь излучения будет увеличиваться, а температура должна уменьшаться. Следует заметить, что при переизлучении падающего потока внутри сечения штанги необходимо различать шероховатость и оптические свойства наружной и внутренней поверхности штанги: $A_s^{нар}$; $A_s^{вн}$; $\varepsilon^{нар}$ и $\varepsilon^{вн}$.

Рассмотрим тепловой баланс на стенках I-I, II-II и III-III при $\theta_S = \frac{\pi}{2}$.

При установившемся состоянии равновесия количество лучистой энергии, поглощённое стенкой I-I и III-III, и количество энергии, излучаемое этими стенками в пространство, между собой равны:

$$\begin{aligned} & A^{нар} \cdot E_{пад} \cdot (S_N^{общ} - S_N^{омв} \cdot K_3) + A^{вн} \cdot E_{переизл} \cdot (S_{общ} - S_{омв} \cdot K_3) = \\ & \xi_{нар} \cdot C_o \cdot (S_{общ} - S_{общ} \cdot K_3) \cdot \left(\frac{T_{III}}{100}\right)^4 + K_o \xi_{вн} \cdot C_o (S_{общ} - S_{омв} \cdot K_3) \cdot \left(\frac{T_I}{100}\right)^4 + \quad (9) \\ & + \xi_{пр} \left[\left(\frac{T_{III}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_I}{100}\right)^4 \right] \cdot C_o \cdot [S_{общ} - S_{омв} (3 - 2K_3)] \end{aligned}$$

где K_o – коэффициент, учитывающий отраженные тепловые потоки;

$K_1 = \frac{S_{омв}}{S_{общ} - S_{омв}}$ – коэффициент, учитывающий общую проходную для лучей площадь отверстий по сечению штанги;

$K_2 = \frac{S_{nnn}}{S_{омв}}$ – коэффициент, учитывающий площадь перекрытия потока лучей по отношению к площади отверстий, пропускающих

поток лучей; $K_3 = \frac{S_N^{омв} - S_N^{nnn}}{S_N^{омв}}$ – коэффициент, учитывающий несовпадение отвер-

стий в месте перехлёста, может изменяться в пределах ($0 \leq K_3 \leq 1$); S_N^{nnn} – площадь перекрытий перемычек внутренней кромки отверстиями наружной; $S_N^{общ}$ – проекция общей поверхности облучения на плоскость, нормальную к падающему излучению; $S_N^{омв}$ – проекция площади отверстий на наружной кромке сечения.

Обозначим отношение $\frac{T_I}{T_{III}} = a$ – коэффициент теплопередачи излучением через зазор. Тогда (9) можно преобразовать к виду:

$$\begin{aligned} & A^{нар} \cdot E_{пад} (S_N^{общ} - S_N^{омв} \cdot K_3) + A^{вн} \cdot E_{переизл} (S_{общ} - S_{омв} \cdot K_3) = \\ & \left\{ \xi^{нар} \cdot C_o (S_{общ} - S_{омв} \cdot K_3) + K_o \xi_{вн} C_o (S_{общ} - S_{омв} \cdot K_3) a^4 + \right. \quad (10) \\ & \left. + \frac{1}{\frac{1}{\xi^{нар}} + \frac{1}{\xi_{вн}} - 1} \cdot C_o \cdot [S_{общ} - S_{омв} (3 - 2K_3)] (1 - a^4) \right\} \left(\frac{T_{III}}{100}\right)^4. \end{aligned}$$

Температуру стенки III-III можно представить уравнением:

$$T_{III} = 100^4 \sqrt{\frac{A_{нар} \cdot E_{над} (S_N^{общ} - S_N^{отв} \cdot K_3^N) + A_{вн} \cdot E_{перезл}^{II-I} (S_{общ} - S_{отв} K_3)}{\xi_{нар} \cdot C_o (S_{общ} - S_{отв} K_3) + K_o \xi_{вн} C_o (S_{общ} - S_{отв} K_3) a^4 + \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{нар}} + \frac{1}{\varepsilon_{вн}} - 1} \cdot C_o \cdot [S_{общ} - S_{отв} (3 - 2K_3)] \cdot (1 - a^4)}}} \quad (11)$$

Тепловой баланс для стенки II-II:

$$\begin{aligned} A_{вн} \cdot E_{над} \cdot S_N^{отв} \cdot K_2^N \cdot K_3^N + A_{вн} \cdot E_{перезл}^{I-II} \cdot (S_{общ} - S_{отв}) &= \\ = K_o \cdot \varepsilon_{вн} \cdot C_o \cdot (S_{общ} - S_{отв}) \cdot \left(\frac{T_{II}}{100}\right)^4 + \xi_{нар} C_o (S_{общ} - S_{отв}) \left(\frac{T_{II}}{100}\right)^4. \end{aligned} \quad (12)$$

Температуру стенки II-II можно представить уравнением:

$$T_{II} = 100^4 \sqrt{\frac{A_{вн} \cdot E_{над} \cdot S_N^{отв} \cdot K_2^N \cdot K_3^N + A_{вн} \cdot E_{перезл}^{I-II} (S_{общ} - S_{отв})}{K_o \cdot \xi_{вн} \cdot C_o (S_{общ} - S_{отв}) + \xi_{нар} C_o (S_{общ} - S_{отв})}} \quad (13)$$

Используя соотношения (11) и (13), получим:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{A}_{i\dot{a}\dot{\delta}}}{\dot{A}_{i\dot{a}\dot{\delta}}} \cdot \frac{\left(S_N^{i\dot{a}\dot{\delta}} - S_N^{i\dot{\delta}\dot{a}} \cdot \hat{E}_3^N \right) + \frac{E_{i\dot{a}\dot{\delta}\dot{a}\dot{\delta}\dot{e}\dot{e}}^{22-2}}{\dot{A}_{i\dot{a}\dot{a}}} \left(S_{i\dot{a}\dot{\delta}} - S_{i\dot{\delta}\dot{a}} \cdot \hat{E}_3 \right)}{S_N^{i\dot{\delta}\dot{a}} \cdot \hat{E}_2^N \cdot \hat{E}_3^N + \frac{E_{i\dot{a}\dot{\delta}\dot{a}\dot{e}\dot{e}}^{2-22}}{\dot{A}_{i\dot{a}\dot{a}}} \left(S_{i\dot{a}\dot{\delta}} - S_{i\dot{\delta}\dot{a}} \right)} &= \\ = \frac{\xi_{i\dot{a}\dot{\delta}} \cdot \tilde{N}_i \left(S_{i\dot{a}\dot{\delta}} - S_{i\dot{\delta}\dot{a}} \hat{E}_3 \right) + \hat{E}_i \xi_{i\dot{a}\dot{a}} \tilde{N}_i \left(S_{i\dot{a}\dot{\delta}} - S_{i\dot{\delta}\dot{a}} \cdot \hat{E}_3 \right) \dot{a}^4}{\xi_{i\dot{a}\dot{\delta}} \cdot \tilde{N}_i \left(S_{i\dot{a}\dot{\delta}} - S_{i\dot{\delta}\dot{a}} \right) + \hat{E}_i \xi_{i\dot{a}\dot{a}} \left(S_{i\dot{a}\dot{\delta}} - S_{i\dot{\delta}\dot{a}} \right) \cdot \tilde{N}_i} + \\ + \frac{1}{\frac{1}{\xi_{i\dot{a}\dot{\delta}}} + \frac{1}{\xi_{i\dot{a}\dot{a}}} - 1} \tilde{N}_i \left[S_{i\dot{a}\dot{\delta}} - S_{i\dot{\delta}\dot{a}} (3 - 2\hat{E}_3) \right] (1 - \dot{a}^4). \end{aligned} \quad (14)$$

После преобразований и сокращений, уравнение (14) примет вид:

$$\frac{\frac{A_{нар}}{A_{вн}} + \frac{K_E}{FS_1}}{K_I^N \cdot K_2^N \cdot K_3^N + \frac{K_E}{FS_2}} = \frac{1 + K_o \cdot \frac{\xi_{вн}}{\xi_{нар}} a^4 + \frac{1}{1 + \frac{\xi_{нар}}{\xi_{вн}} - \xi_{нар}} \cdot F_{S \cdot \Phi n} (1 - a^4)}{F_{S \cdot n} + K_o \cdot \frac{\xi_{вн}}{\xi_{нар}} \cdot F_{S \cdot n}}, \quad (15)$$

где $F_{S_I} = \frac{S_{общ}^N - S_{отв}^N K_3^N}{S_{общ}^N - S_{отв}^N K_3^N}$ – фактор, учитывающий эффективную нормальную площадь поверхности внутри сечения стержня на участке перекрытия;
 $F_{S_2} = \frac{S_{общ}^N - S_{отв}^N \cdot K_3^N}{S_{общ}^N - S_{отв}^N}$ – фактор, учитывающий эффективную нормальную площадь

поверхности внутри сечения стержня на участке без перекрытия; $K_E = \frac{E_{переизл}}{E_{над}}$ –

коэффициент, учитывающий долю лучистого потока внутри сечения стержня;

$F_{sn} = \frac{S_{общ} - S_{омв}}{S_{общ} - S_{омв} \cdot K_3}$ – фактор, учитывающий эффективную полную площадь пере-

мычек на наружной стороне по отношению к перекрытию кромок в месте перехлё-

ста; $F_{S\Phi\Phi} = \frac{S_{общ} - S_{омв} (3 - 2K_3)}{S_{общ} - S_{омв} \cdot K_3}$ – фактор, учитывающий эффективную полную

площадь перекрытия перемычек на фронтальной и теневой стороне сечения по от-

ношению к площади перекрытия перемычек в области перехлёста. Обозначим правую часть уравнения (15) через параметр B . Тогда уравнение (15) примет вид:

$$\frac{A_{нар}}{A_{вн}} = B \left(K_I^N \cdot K_2^N \cdot K_3^N + \frac{K_E}{F_{SII}} \right) - \frac{K_E}{F_{SI}}. \quad (16)$$

Анализируя зависимость (16), можно заключить, что отношение поглотительной способности наружной поверхности к внутренней будет зависеть от многих факторов: от коэффициентов использования площади развертки и в целом сечения; от условий перекрытия кромок отверстий в месте перехлёста, между фронтальным и теневым участком сечения; от эффективной доставки доли падающего излучения на теневую сторону сечения; от соотношения коэффициентов излучения внутренней и наружной поверхности штанги.

При условии отсутствия перекрытия перемычек отверстиями в области перехлёста и, если внешняя и внутренняя сторона в местах перехлёста в зазоре обладает одной и той же излучательной способностью, выражение упростится:

$$\frac{As_{нар}}{As_{вн}} = K_1^N \cdot K_2^N,$$

так как $\frac{\xi_{вн}}{\xi_{нар}} \rightarrow 1$; $\alpha \rightarrow 1$, $F_{S\Phi\Phi} \rightarrow 1$, $F_{sn} \rightarrow 1$, то $K_3 \rightarrow 1$; $F_{SI} \rightarrow F_{SII}$.

И параметр B принимает значение, равное 1. Или

$$\frac{As_{нар}}{As_{вн}} = K_1^N \cdot K_2^N = \frac{S_N^{nnn}}{S_N^{общ} - S_N^{омв}}, \quad (17)$$

т.е. отношение коэффициентов поглощения наружной к внутренней поверхности сечения прямо пропорционально доле площади перекрытой поверхности перемычек на теневой стороне по отношению к общей площади перемычек на фронтальной стороне сечения.

При условии полного перекрытия поверхности перемычек теневой стороны отверстиями фронтальной стороны $K_2^N \rightarrow 1$, тогда уравнение (17) можно представить в виде:

$$\frac{As_{нар}}{As_{вн}} = \frac{1}{F_{нар}} \cdot \frac{S_{омв}}{S_{общ} - S_{омв}}, \quad (18)$$

где F – фактор шероховатости на наружной поверхности.

Лучшим условием работы штанги будет восприятие энергии падающего излучения при значении угла падения $\theta_s = \frac{3}{2}\pi$.

Рассуждая аналогичным образом, получим уравнение связи между соотношением коэффициентов поглощения $\frac{A_S^{нар}}{A_S^{вн}}$ и геометрическими факторами F , K_1^N и K_2^N :

$$\frac{A_S^{нар}}{A_S^{вн}} = \frac{F_{вн}}{F_{нар}} \cdot K_1 \cdot K_2. \quad (19)$$

Приведенные выше рассуждения показывают, что при определенной системе отверстий можно добиться того, чтобы отношение теплового потока, попадающего на освещенную сторону штанги, к тепловому потоку, попадающему на затененную сторону, оставалось постоянным при различных ориентациях штанги по отношению к солнечным лучам.

При заданных размещении отверстий по развертке штанги и ее материале, выбор параметров, обеспечивающих уменьшение температурных деформаций штанги под действием солнечной радиации, касается только выбора коэффициентов поглощения по отношению к солнечным лучам для наружной стороны штанги $A_S^{нар}$ и ее внутренней стороны $A_S^{вн}$.

Литература: 1. Попов В.И. Системы ориентации и стабилизации космических аппаратов. – М. Машиностроение, 1986. – 184 с. 2. Григорьев Л.Я., Маньковский О.Н. Инженерные задачи нестационарного теплообмена. – Л.: Изд. «Энергия», 1968. – 72 с. 3. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. – М.: Изд. «Мир». – 258 с. 4. Прецизионные сплавы с особыми свойствами упругости и теплового расширения. – М.: Изд. «Стандарты», 1972. 5. Kemper A., Farrell K. Temperature Gradients and Distortion De Havilland Technical Note, 1962, XII, №164.

УДК 621.923

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОПЕРАЦИЙ
ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ
ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Гуцаленко Ю.Г., Новиков Ф.В., докт. техн. наук (г. Харьков, Украина)

Results theoretical and experimental researches of high-efficiency diamond grinding are resulted.

На ряде операций шлифования изделий из труднообрабатываемых материалов используются алмазные круги на металлических связках, характеризующиеся чрезвычайно высокой износостойкостью и обеспечивающие повышение производительности и качества обработки при съеме относительно больших припусков. Для поддержания их высокой режущей способности разработаны эффективные методы электрохимической и электроэрозионной правки, комбинированные процессы шлифования, основанные на введении в зону резания дополнительной электрической энергии (например, процесс алмазно-искрового шлифования). Вместе с тем, их потенциальные возможности в полной мере не изучены и не используются на практике. Это, с одной стороны, сдерживает широкое внедрение алмазных кругов на металлических связках в производство, а с другой стороны, требует проведения комплекса исследований по выбору, обоснованию и реализации новых технологических

возможностей алмазного шлифования на основе математического моделирования и оптимизации параметров операций шлифования. Полученные решения будут иметь большое значение при проектировании технологических операций круглого наружного (внутреннего) и плоского алмазного шлифования изделий из таких высокопрочных пластичных материалов как износостойкие наплавки, высокопрочные стали и т.д., шлифование которых абразивными и алмазными кругами затруднено в силу низких показателей производительности и качества обработки.

Цель работы – обоснование условий повышения эффективности операций алмазного шлифования изделий из высокопрочных пластичных материалов на основе математического моделирования операций и теоретического анализа их технологических возможностей [1].

Для этого разработана математическая (аналитическая) модель устойчивого во времени процесса высокопроизводительного шлифования алмазным кругом на металлической связке [2–8]. Ее основу составляет условие равномерного во времени износа круга при шлифовании (рис. 1)

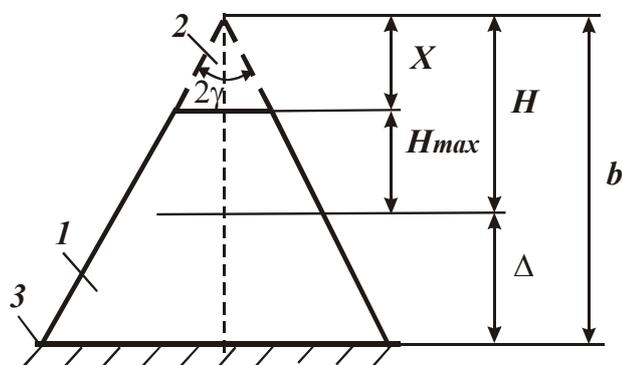


Рис. 1. Расчетная схема параметров шлифования: 1 – зерно; 2 – изношенная часть зерна; 3 – уровень связки круга.

$$\tau = \frac{H}{V_{св}} = \frac{x}{V_{зер}} \quad (1)$$

и вытекающее из него соотношение средней скорости износа зерна $V_{зер}$ и скорости износа связки $V_{св}$ круга

$$\frac{V_{зер}}{V_{св}} = \eta, \quad (2)$$

где τ - время контакта режущего зерна с обрабатываемым материалом до момента его выпадения из связки круга, с; x - величина линейного износа зерна, м;

$$H = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{tg \gamma \cdot m \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta^2)}} - \text{максимальная глубина внедрения обрабатываемого}$$

материала в рабочую поверхность круга, отсчитывая ее от вершины исходного (неизношенного) максимально выступающего над уровнем связки зерна, м; $H_{max} = (1 - \eta) \cdot H$ - максимальная (вероятностная) толщина среза, м; $\eta = x / H$ - безразмерный коэффициент, учитывающий степень затупления зерна ($\eta \rightarrow 0$ - для острого зерна, $\eta \rightarrow 1$ - для затупленного зерна); 2γ - угол при вершине конусообразного режущего зерна; \bar{X} - зернистость круга, м; m - объемная концентрация зерен круга; $V_{кр}$, $V_{дет}$ - соответственно скорости круга и детали при круглом наружном (внутреннем и плоском) шлифовании, м/с; t - глубина шлифования, м; $\rho = 1/R_{кр} + 1/R_{дет}$; $R_{кр}$, $R_{дет}$ - соответственно радиусы круга и детали, м.

В теории шлифования принято считать, что условием стабилизации во времени процесса шлифования является равенство скоростей износа зерен и связки круга $V_{св} = V_{зер}$. В действительности, как следует из зависимости (2), стабилизировать процесс шлифования можно при условии $V_{св} > V_{зер}$ ($0 < \eta < 1$). При условии $V_{св} = V_{зер}$ ($\eta = 1$) процесс резания при шлифовании неосуществим. Исключением является

лишь процесс шлифования синтетических сверхтвердых материалов, когда практически отсутствует внедрение зерен алмазного круга в обрабатываемый материал и $x \rightarrow H$, т.е. $\eta \rightarrow 1$.

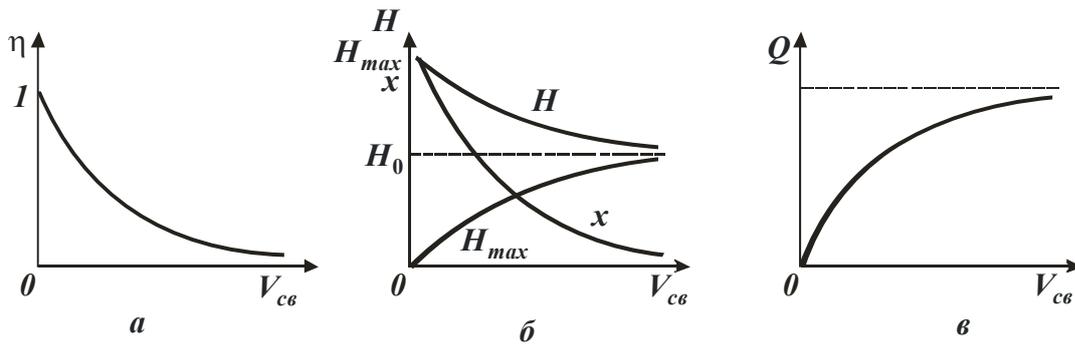


Рис. 2. Характер изменения безразмерного коэффициента η и параметров H, H_{max}, x, Q с изменением скорости износа связки круга $V_{св}$.



Рис. 3. Структурная схема, показывающая влияние скорости износа связки круга $V_{св}$ на основные параметры шлифования.

Теоретически установлено, что с увеличением скорости износа связки $V_{св}$ безразмерный коэффициент η и величина x неограниченно уменьшаются; параметры H и H_{max} стремятся принять значение $H_0 = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дем} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{tg \gamma \cdot m \cdot V_{кр}}}$, а производительность обработки Q - увеличивается, рис. 2. Этим показано, что связь между скоростью износа связки $V_{св}$ и параметрами шлифования обусловлена безразмерным коэффициентом η , рис. 3. Следовательно, обеспечить выполнение условия

$V_{св} > V_{зер}$ можно, прежде всего, за счет регулирования скорости износа связки $V_{св}$, реализуя режим самозатачивания алмазного круга или применяя алмазно-искровое шлифование, позволяющее интенсифицировать процесс разрушения металлической связки круга. Из этого вытекает, что при алмазно-искровом шлифовании увеличение скорости износа связки круга $V_{св}$ приводит к уменьшению безразмерного коэффициента $\eta \rightarrow 0$ и соответственно величины линейного износа зерна x .

Получены аналитические зависимости, описывающие параметры устойчивого во времени режущего рельефа алмазного круга, и основные технологические показатели высокопроизводительного алмазного шлифования изделий из высокопрочных пластичных материалов с учетом разделения максимальной высоты выступания зерен над уровнем связки b на три составляющие, равные соответственно величине линейного износа максимально выступающего над уровнем связки зерна x , максимальной толщине среза H_{max} и толщине слоя Δ , заполняемого образующимися стружками и другими продуктами обработки (рис. 1):

$$b = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot Q}{m \cdot V_{кр} \cdot B \cdot (1 - \eta^2)}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} + \frac{Q}{V_{кр} \cdot B} \cdot \xi, \quad (3)$$

где $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$ - производительность обработки, м³/с; B - ширина круга, м; ξ - коэффициент, учитывающий степень заполнения стружкой межзеренного пространства круга ($\xi > 1$).

Первое слагаемое в правой части уравнения (3) определяет глубину внедрения обрабатываемого материала в рабочую поверхность круга H , а второе - высоту межзеренного пространства круга, заполняемого стружкой Δ . По мере затупления зерен (увеличения безразмерного коэффициента $\eta \rightarrow 0$) при условии $b = const$ первое слагаемое увеличивается, а второе уменьшается.

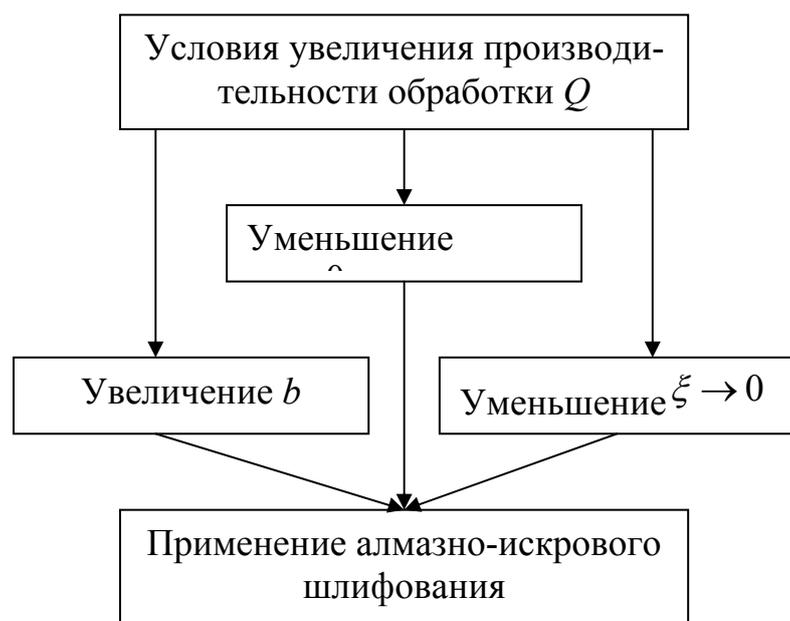


Рис. 4. Структурная схема условий увеличения производительности обработки.

мер, за счет применения алмазно-искрового шлифования, обеспечивающего частич-

Безразмерный коэффициент ξ зависит от обрабатываемого материала. При обработке твердых сплавов и других хрупких материалов $\xi \approx 1$. При обработке пластичных материалов $\xi > 1$. Очевидно, при определенных условиях безразмерный коэффициент ξ может принимать относительно большие значения, тогда второе слагаемое уравнения (3) примет значение, близкое к величине b . В этом случае процесс шлифования практически неосуществим. Для эффективного ведения процесса шлифования необходимо уменьшить безразмерный коэффициент ξ , напри-

ное сгорание стружек.

Наибольшее влияние на производительность обработки Q оказывает безразмерный коэффициент η , т.к. при условии $\eta \rightarrow 1$ первое слагаемое уравнения (3) стремится к бесконечности.

Из этого следует, что основным условием существенного увеличения производительности обработки необходимо рассматривать обеспечение высокой остроты режущих зерен. При этом необходимо добиваться увеличенного выступания зерен над уровнем связки (увеличения b) и уменьшения коэффициента ξ . Эффективным техническим решением данной задачи является применение метода алмазно-искрового шлифования. За счет возбуждения в зоне резания электрических разрядов происходит термическое разрушение поверхностных слоев металлической связки алмазного круга и частичное сгорание (испарение) образующихся стружек обрабатываемого металла или сплава. В результате осуществляется целенаправленное принудительное удаление затупившихся зёрен, обеспечиваются основные условия повышения производительности обработки Q (рис. 4): уменьшаются безразмерные коэффициенты η и ξ , увеличивается параметр b .

Разрешим уравнение (3) относительно неизвестного параметра Q для условия $\eta < 0,8$:

$$Q = \frac{V_{кр} \cdot B \cdot b^2}{\xi \cdot \left[\sqrt{\frac{1}{4 \cdot \xi \cdot (H_0 - x)^{2/3}} \cdot \frac{630 \pi \cdot \bar{X}^3}{m} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} + b + \frac{0,5}{\xi^{1/2} \cdot (H_0 - x)^{1/3}} \cdot \frac{630 \pi \cdot \bar{X}^3}{m} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}}} \right]^2}. \quad (4)$$

где

$$H_0 = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot Q}{m \cdot V_{кр} \cdot B} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}}}.$$

Наибольшее влияние на производительность обработки Q оказывает разность параметров $(H_0 - x)$. С ее уменьшением производительность обработки Q уменьшается вплоть до нуля. Это происходит за счет увеличения величины линейного износа зерна x до значения H_0 , т.е. при выполнении условия $x \rightarrow H_0$. Поэтому с целью увеличения производительности обработки Q следует уменьшать величину x и увеличивать параметр H_0 , который по физической сути определяет максимальную толщину среза неизношенными зернами круга (т.е. при шлифовании вновь заправленным кругом). Уменьшение величины линейного износа зерна x предполагает уменьшение безразмерного коэффициента $\eta = x / H$.

Решение уравнения (3) для случая $0,8 < \eta < 1,0$:

$$Q = \frac{(b - x) \cdot V_{кр} \cdot B}{\xi}. \quad (5)$$

Производительность обработки Q тем больше, чем больше максимальная высота выступания изношенных зерен над уровнем связки круга $(b - x)$, соответственно параметры $V_{кр}$, B и меньше безразмерный коэффициент ξ .

Экспериментально установлено (рис. 5,а), что с увеличением силы тока I при плоском алмазно-искровом шлифовании удельный расход алмаза q и параметр ше-

роховатости обработки R_a непрерывно увеличиваются. При этом скорость износа связки круга $V_{св}$, которая с физической точки зрения пропорциональна произведению удельного расхода алмаза q и производительности обработки Q , также увеличивается. Следовательно, уменьшается безразмерный коэффициент η , согласно зависимости (2).

Аналогичный вывод можно сделать, анализируя график изменения параметра R_a с помощью аналитической зависимости:

$$R_a = 2 \cdot 5 \sqrt{\frac{(1-\eta)^4}{(1+\eta)^2} \cdot \frac{4 \cdot \pi^4 \cdot \bar{X}^6 \cdot R_{дет}^2 \cdot S_{np}^2 \cdot \rho}{tg^2 \gamma \cdot m^2 \cdot V_{кр}^2 \cdot B^2}}, \quad (6)$$

где S_{np} - скорость продольной подачи, м/с.

Как следует из рис. 5,а, с увеличением силы тока I параметр R_a увеличивается, что, согласно зависимости (6), ведет к уменьшению безразмерного коэффициента

η . Уменьшение мощности шлифования N с увеличением силы тока I (рис. 5,б) также связано с уменьшением безразмерного коэффициента η вследствие осуществления процесса резания более острыми зернами круга.

Используя полученные экспериментальные данные производительности обработки Q , удельного расхода алмаза q , мощности шлифования N , параметра шероховатости обработки R_a , по соответствующим методикам расчетно-экспериментальным путем были определены значения безразмерного коэффициента η для алмазного и алмазно-искрового шлифования. Исходя из зависимости (2), это соответствует большей скорости износа металлической связки круга (за счет ее ударно-термического разрушения от действия электрических разрядов), а, соглас-

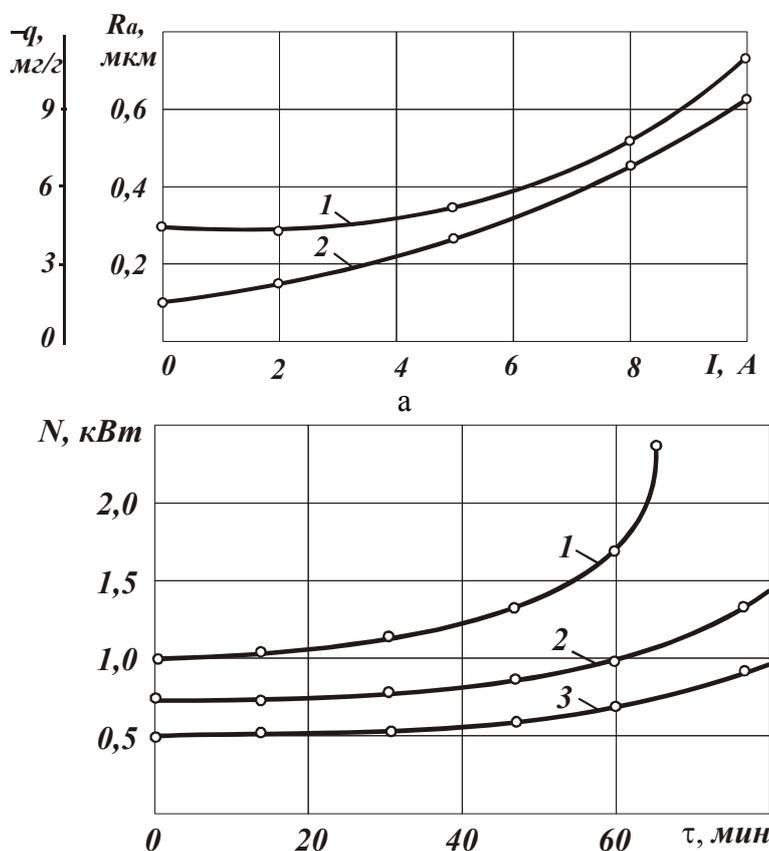


Рис. 5. Зависимость параметра шероховатости обработанной поверхности R_a (1) и удельного расхода алмаза q (2) от силы тока I ; б – зависимость мощности резания N от времени обработки τ : 1 - $I=0$; 2 - $I=5A$; 3 - $I=10A$. Обрабатываемый материал - сталь ХЗФ8; алмазный круг - 1А1 250х15х5 АС6 100/80 М2-01 4; режим шлифования - $V_{кр}=35$ м/с, $V_{дет}=10$ м/с, $S_{нон}=3,3$ мм/дв. ход, $t=0,018$ мм; номинальная производительность обработки $Q=300$ мм³/мин.

но уравнения (3), - большей производительности алмазно-искрового шлифования.

В работе теоретически выявлен и экспериментально подтвержден экстремальный характер изменения удельного расхода алмаза q и технологической себестоимости обработки с изменением производительности Q и безразмерного коэффициента η при шлифовании изделий из высокопрочных пластичных материалов:

$$q = \frac{\rho_a}{\rho_m} \cdot \frac{\pi \cdot D_{кр} \cdot B \cdot \alpha}{Q} \cdot \frac{V_{зер}}{\left[1 - \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot Q}{m \cdot V_{кр} \cdot B} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} \cdot \frac{1}{\left(b - \frac{Q \cdot \xi}{V_{кр} \cdot B} \right)^3} \right]} \approx \frac{\rho_a}{\rho_m} \cdot \frac{630 \cdot \pi^2 \cdot \bar{X}^3 \cdot D_{кр} \cdot \alpha \cdot V_{зер}}{m \cdot V_{кр} \cdot b^3} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} \cdot \frac{1}{\eta \cdot (1 - \eta)}, \quad (7)$$

где ρ_a, ρ_m - соответственно плотности алмаза и обрабатываемого материала, кг/м³; $D_{кр}, B$ - соответственно диаметр и ширина алмазного круга, м; α - коэффициент, учитывающий плотность связки в зависимости от концентрации алмазных зёрен в круге.

Так, на основе зависимости (7) установлено, что экстремум (минимум) удельного расхода алмаза q достигается при $\eta=0,5$. Установлено так же, что в точке минимума технологической себестоимости обработки экстремальное значение производительности больше, а экстремальное значение безразмерного коэффициента η меньше, чем в точке минимума удельного расхода алмаза, рис. 6. Этим подтвержде-

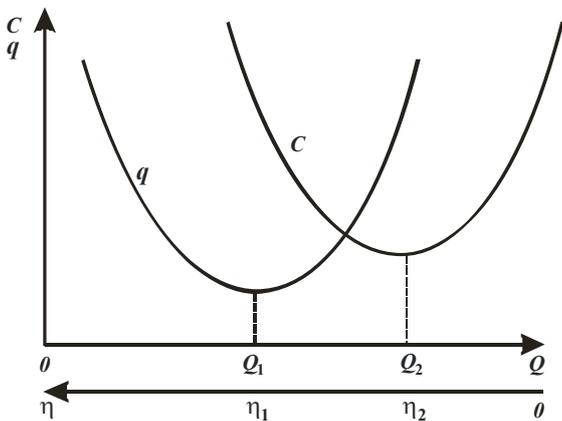


Рис. 6. Зависимости удельного расхода алмаза q и технологической себестоимости C от производительности обработки Q и безразмерного коэффициента η (где $n_1 > n_2$.)

на достоверность полученных теоретических решений и сделан вывод о том, что в основу расчета оптимальных параметров рассматриваемых операций алмазного шлифования необходимо положить безразмерный коэффициент η , который определяет соотношение $V_{зер} / V_{св}$ и условия формирования основных показателей обработки.

С учетом этого теоретически и экспериментально обоснованы технологические возможности повышения эффективности операций алмазного шлифования. На основе аналитических зависимостей для определения шероховатости обработки и удельного расхода алмаза и соответствующих экспериментальных данных произведена оценка влияния кинематического и физического (обусловленного безразмерным коэффициентом η) факторов на формирование основных пока-

зателей алмазного шлифования. Так, с увеличением η коэффициент $k = 5 \sqrt{\frac{(1-\eta)^4}{(1+\eta)^2}}$,

входящий в зависимость (6), уменьшается, табл. 1. Это указывает на возможность значительного уменьшения параметра R_a за счет создания на зернах площадок, особенно в диапазоне $\eta > 0,8$.

Таблица 1

Расчётные значения коэффициента k

η	0	0,3	0,5	0,8	0,9	0,95
k	1,0	0,64	0,48	0,41	0,12	0,07

В работе аналитически установлена связь безразмерного коэффициента η с известным соотношением a_z / R , определяющим условия стружкообразования при микрорезании отдельным зерном (где a_z - толщина среза, м; R - радиус округления вершины зерна). По данным проф. Крагельского И.В., переход от процесса упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала к процессу микрорезания осуществляется при условии $a_z / R > 0,04$. Это соответствует изменению безразмерного коэффициента η в пределах 0,13...0,91, табл. 2. Чем больше соотношение a_z / R , т.е. чем интенсивнее процесс стружкообразования при шлифовании, тем меньше значения η и больше производительность обработки Q , исходя из уравнения (3). Наибольшему значению $\eta = 0,91$ (при $\gamma = 45^\circ$) соответствует наименьшее значение $a_z / R = 0,04$. Такое же значение η получено экспериментально при шлифовании алмазными зернами с искусственно созданными на них площадками. За счет этого, например, по данным Дитиненко С.А., удалось уменьшить параметр шероховатости обработки R_a с 2,0 до 0,1 мкм.

Таблица 2

Расчетные значения η

a_z / R	0,04	0,01	0,2	0,3	0,5	1,0
γ , град						
45	0,91	0,805	0,67	0,58	0,45	0,29
60	0,78	0,6	0,43	0,33	0,23	0,13

Установленная связь безразмерного коэффициента η и соотношения a_z / R позволяет оценить возможность осуществления процесса микрорезания при шлифовании для конкретных значений η , полученных, например, исходя из минимума технологической себестоимости обработки или из условия обеспечения заданной шероховатости и т.д. При необходимости – позволяет корректировать установленные значения η .

В работе получены аналитические зависимости для определения составляющих силы резания, в частности, радиальной составляющей силы резания P_y , выраженной через радиус округления вершины зерна R :

$$P_y = 2,25 \cdot \left(\frac{R}{X}\right)^2 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{m \cdot Q \cdot HV}{315 \cdot \pi}\right)^2} \cdot \frac{B \cdot \tau_{сдв}}{V_{дет} \cdot V_{кр} \cdot \rho}, \quad (8)$$

где HV , $\tau_{сдв}$ - соответственно твёрдость (по Виккерсу) и предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала, Н/м².

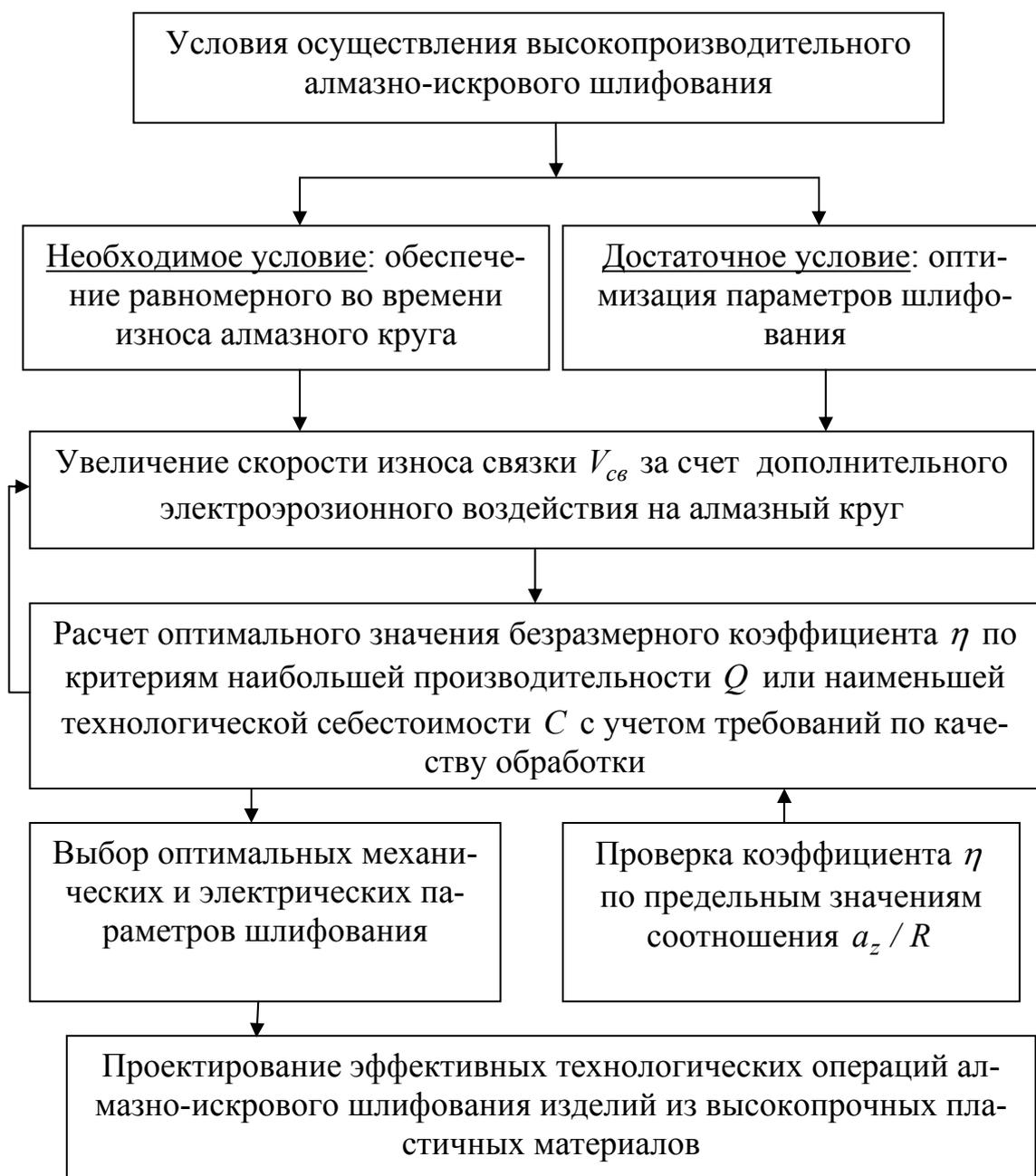


Рис. 7. Структурная схема выбора оптимальных условий алмазно-искрового шлифования.

Исходя из зависимости (8), наибольшее влияние на P_y оказывает соотношение R/\bar{X} . Для начального момента обработки можно принять $\bar{X}=2R$. По мере износа зерна параметр R и соответственно P_y увеличиваются, а $\bar{X}<2R$. Чтобы уменьшить P_y в процессе шлифования необходимо регулировать параметр R путем введения в зону резания дополнительной электрической энергии, своевременно удаляя затупившиеся зерна, т.е. поддерживая в процессе заданное значение R . Эффективно также увеличивать зернистость круга \bar{X} с целью снижения интенсивности роста параметра R , что хорошо согласуется с практикой алмазного шлифования.

Обеспечить уменьшение P_y при условии $Q = const$ можно увеличением

скоростей детали $V_{дет}$ и круга $V_{кр}$, т.е. применением многопроходного высокоскоростного шлифования.

На основе приведенных решений может быть предложена следующая методика выбора оптимальных параметров операций алмазно-искрового шлифования изделий из высокопрочных пластичных материалов, рис. 7.

Данная методика отличается от известных аналогичных методик и позволяет в большей степени использовать потенциальные возможности алмазного шлифования.

Литература: 1. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования. – Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Одесса: ОГПУ, 1995. – 36 с. 2. Гуцаленко Ю.Г. Алмазное электроэрозионное шлифование теплостойких наплавов. - Авиационно-космическая техника и технология. Труды Государственного аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ". - Харьков: ХАИ, 2000, вып.14. – С. 355- 357. 3. Новиков Г.В., Гуцаленко Ю.Г. Роль кинематического и физического факторов в процессе шлифования. - Резание и инструмент в технологических системах. – Междунар. научно-техн. сборник. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Вып. 58. – С. 116-123. 4. Гуцаленко Ю.Г., Новиков Г.В. Формирование режущего рельефа круга и обеспечение производительности обработки при алмазном электроэрозионном шлифовании. – Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": Збірка наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ "ХП". – 2001. - № 6. – С. 48-52. 5. Новиков Ф.В., Гуцаленко Ю.Г. Условия повышения производительности алмазного шлифования. – Вісник НТУ "ХП". Збірка наукових праць. Тем. вип. Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ "ХП". – 2001. - № 4. – С. 194-197. 6. Новиков Ф.В., Гуцаленко Ю.Г. Формирование рабочей поверхности алмазного круга в процессе шлифования. – Вісник НТУ "ХП" Збірник наукових праць. Тем. вип.: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ "ХП". – 2002. - № 9, т. 10. – С. 115-120. 7. Гуцаленко Ю.Г. Алмазно-искровое шлифование высокопрочных пластичных материалов. – Вісник інженерної академії України, спец. випуск, Київ, 2002. – С. 259 – 262.

УДК 621.923

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОЩАДИ ПЯТНА КОНТАКТА
ПОЛИМЕР-АБРАЗИВНОГО ЭЛАСТИЧНОГО ИНСТРУМЕНТА
С ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Проволоцкий А.Е., докт. техн. наук, Негруб С. Л.

(г. Днепропетровск, Украина)

In the article, the method of determination of area of spot of contact at treatment is considered polymer - abrasive elastic around a flat, outward and internal cylindrical surface. Determination of area of spot of contact is a polymer - abrasive instrument with the processed surface.

Определение величины площади пятна контакта полимер – абразивного эластичного инструмента с обрабатываемой поверхностью разных видов является важной задачей на этапе определения основных технологических характеристик техпроцесса [1-3]. Так, например, от величины площади контакта будет зависеть производительность обработки, величины силы резания, момента резания и мощности резания.

Некоторая величина пятна контакта возникает в момент касания инструмента с обрабатываемой поверхностью, однако, эта величина существенно изменится после придания инструменту начальной деформации. Рассмотренные конфигурации воз-

можных пятен контакта [3] возникающих при разных условиях обработки, существенно отличаются друг от друга своими размерами. В процессе обработки волокно изгибается и при снятии слоя полимера в работу вступают абразивные зерна, располагающиеся по некоторому эллипсу. В момент обработки самими кончиками волокон – торцами – обработка абразивными зернами происходит по кругу.

Даже при условии, когда в работе будет участвовать одинаковое количество волокон, при различных схемах обработки площадь образующегося пятна будет различна, а, следовательно, различной будет и производительность обработки. Определение площади пятна контакта, условно принятого равным некоторому прямоугольнику, или длин его сторон неоднозначно.

Так, например, решение этой задачи будет зависеть в первую очередь от вида обрабатываемой поверхности, так как именно он определяет характер контакта инструмента и обрабатываемой поверхности. Второй значимой величиной выступает величина начальной деформации инструмента, так как она определяет величину угла сектора контакта, возникающего при рассмотрении рабочих схем и нагрузки, испытываемые рабочим волокном в процессе [1].

Деформация рабочих волокон после придания ему некоторой деформации происходит сразу в двух плоскостях: в плоскости сектора обработки и в плоскости торца инструмента, что не только раздвигает волокна в стороны, увеличивая сектор контакта, но и «распушивает» инструмент, увеличивая его ширину. Для технологического процесса необходимо оптимально выбрать величину начальной деформации, размеры и характеристики инструмента, нагрузку прижатия инструмента к поверхности не только для его оптимальной эксплуатации, но и для оптимальной величины производительности, так как смещение волокон от своего первоначального положения привносит в объем рабочей части некоторый объем пустот, не выполняющих полезной работы.

«Узким» местом поставленной задачи является неизвестный характер деформации рабочей части инструмента в торцевой плоскости обработки. Понятие сектора контакта справедливо только при рассмотрении контакта в одной плоскости. В плоскости торца инструмента, там, где определяется ширина инструмента, распределение волокон так же происходит, но не до конца не ясно, как геометрически определить величину, на которую уширяется инструмент.

Решению этой задачи, а также определению количества волокон, площади пятна контакта и прочих необходимых величин для определения предельно допустимых напряжений для эластичного инструмента посвящена представленная работа.

Рассмотрены случаи определения величины площади пятна контакта для обрабатываемых поверхностей имеющих вид плоскости, наружной и внутренней цилиндрической поверхности.

Для определения длины пятна контакта предложено воспользоваться геометрическими зависимостями величин рабочего сектора инструмента, а для определения ширины - воспользоваться выражениями, полученными в работах [1,2] для определения прогиба волокна. Эти выражения учитывают все виды нагрузок, испытываемые отдельными волокнами на различных этапах обработки, и определяют величину прогиба волокна под их воздействием. Таким образом, зная величину прогиба волокна можно считать, что величина уширения инструмента равна двум прогибам его волокон. Зная величины длины и ширины пятна контакта можно определить площадь пятна контакта.

Однако для непосредственного использования этой величины в технологическом процессе не происходит. Знание величины площади пятна контакта позволяет определить собственно количество волокон m и n , приходящихся на пятно контакта и непосредственно участвующих в процессе резания в текущий момент времени. Знать эти величины необходимо для определения предельно допустимых напряжений волокна рабочей части инструмента, чтобы не допускать преждевременного его износа и управлять производительностью процесса. От числа волокон, участвующих в работе и формирующих пятно контакта, зависят непосредственно величины силы резания, момента резания и мощности резания. Таким образом, получена возможность определить аналитически, а не эмпирически, как было принято до сих пор, такие технологические величины как сила резания, мощность и момент резания, а значит можно определить и мощность оборудования, на котором следует вести обработку.

Литература: 1. Проволоцкий А.Е., Колесник И.А., Негруб С.Л. Аналитические исследования прочности волокна полимер-абразивного инструмента. - «Резание и инструмент в технологических системах», НТУ «ХПИ», Харьков, 2002, Вып. 63., 2. Проволоцкий А.Е., Колесник И.А., Негруб С.Л. Исследование контакта полимер-абразивных волокон эластичных кругов. – Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – межд. сб. научн.-техн. трудов.- Донецк: ДонНТУ, Вып. №28.- 2004, 77-83 с., 3.Проволоцкий А.Е., Колесник И.А., Негруб С.Л. Контактное взаимодействие эластичных инструментов с обрабатываемой поверхностью. – Физические и компьютерные технологии. Труды 10-й межд. научно-техн. конфер., 28-30.09.2004 г. - Харьков: ХНПК «ФЭД», 2004.-52-54 с.

УДК 621.923

НОВЫЙ УПРОЩЕННЫЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ ПРИ ЕЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, **Яценко С.М.** (г. Харьков, Украина)

The new simplified approach to calculation of temperature of a superficial layer of a detail is offered at its machining.

Вопросам исследования тепловых процессов при механической обработке уделяется большое внимание. Эти процессы чрезвычайно сложны и требуют применения уравнений математической физики для аналитического описания тепловых полей в зоне резания. Вместе с тем, для инженерного расчета температуры резания важно располагать достаточно простыми решениями, позволяющими описать температуру в виде простых формул. Это требует разработки новых подходов к расчету и анализу температуры, в особенности, поверхностного слоя детали с целью определения условий ее бездефектной обработки.

При расчете температуры при шлифовании традиционно исходят из расчетной схемы перемещения теплового источника по полуплоскости [1, 2]. Данная схема фактически соответствует условиям трения шлифовального круга с обрабатываемым материалом и не учитывает процесс резания (процесс снятия припуска). Так, в классической упрощенной расчетной схеме, впервые предложенной проф. Якимовым А.В., поверхностный слой обрабатываемой детали представлен множеством адиабатических стержней, которые нагреваются до температуры шлифования за время контакта их с шлифовальным кругом. В последующих работах, чтобы учесть физику резания (съема припуска), проф.

Якимов А.В. предложил рассматривать условия перерезания стержней (в пределах толщины снимаемого припуска). В этом случае предполагается, что стержни выступают над обработанной поверхностью на величину, равную глубине шлифования, и в процессе шлифования срезаются. В итоге пришли к задаче о нагревании стержня от действия приложенного на его свободном конце и движущегося с определенной скоростью вдоль стержня теплового источника.

В настоящей работе проведем теоретический анализ параметров теплового процесса без учета и с учетом перерезания стержней.

Расчет температуры резания произведем на примере плоского шлифования периферией круга. Обрабатываемую деталь представим в виде бесконечного множества прямолинейных стержней длиной l_2 , расположенных по нормали к обрабатываемой поверхности. Пусть площадь поперечного сечения стержня равна S , тогда за время τ действия теплового источника стержень получит Q тепла

$$Q = \lambda \cdot S \cdot \frac{\theta_2 - \theta_1}{l_2} \cdot \tau, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К; θ_1 и θ_2 – установившиеся температуры на концах стержня, К.

За это же время температура стержня выросла от θ_1 (равной температуре на свободном конце стержня) до значения θ_2 (равной температуре в месте контакта круга со стержнем). Тогда средняя температура стержня равна $\theta_{cp} = 0,5 \cdot (\theta_2 - \theta_1)$. Исходя из этого, количество тепла Q , соответствующее повышению стержня на температуру θ_{cp} , определится

$$Q = m \cdot c \cdot 0,5 \cdot (\theta_2 - \theta_1), \quad (2)$$

где $m = S \cdot l_2 \cdot \rho_m$ – масса стержня, кг; ρ_m – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К).

С учетом соотношения $Q = N \cdot \tau$, где N – мощность теплового источника, разрешим зависимость (1) относительно длины l_2 :

$$l_2 = \frac{N \cdot \tau}{0,5 \cdot c \cdot \theta \cdot S \cdot \rho_m}. \quad (3)$$

Здесь $\theta = \theta_2$, параметром θ_1 в силу его малости $\theta_1 = 0$ для упрощения расчетов пренебрегли.

Подставляя зависимость (3) в (2) с учетом плотности теплового источника $q = N / S$, получим расчетную зависимость для определения температуры резания θ :

$$\theta = q \cdot \sqrt{\frac{2\tau}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m}}. \quad (4)$$

Соответственно длина стержня l_2 , т.е. толщина поверхностного слоя материала, в котором концентрируется тепло, определится:

$$l_2 = \sqrt{\frac{2\tau \cdot \lambda}{c \cdot \rho_m}}. \quad (5)$$

Среднюю скорость распространения тепла вглубь стержня (т.е. вглубь обрабатываемого материала) получим из соотношения l_2 / τ :

$$V_{\theta, \text{cp}} = \sqrt{\frac{2\lambda}{c \cdot \rho_m \cdot \tau}} \quad (6)$$

Мгновенную скорость распространения тепла вглубь стержня получим дифференцированием по времени τ длины стержня l_2 :

$$V_{\theta} = \frac{dl_2}{d\tau} = \sqrt{\frac{\lambda}{2 \cdot c \cdot \rho_m \cdot \tau}} \quad (7)$$

Как видим, средняя скорость распространения тепла $V_{\theta, \text{cp}}$ в два раза больше мгновенной скорости распространения тепла V_{θ} .

Рассчитаем параметры $\tau = h / V_{\text{дет}}$, l_2 и V_{θ} , где $V_{\text{дет}}$ – скорость детали, м/с; h – длина дуги контакта круга с деталью, м, определяется по зависимости [3]: $h = \sqrt{\frac{2 \cdot t}{\rho}}$;

t – глубина шлифования, м; $\rho = \frac{1}{R_{\text{кр}}} + \frac{1}{R_{\text{дет}}}$; $R_{\text{кр}}$, $R_{\text{дет}}$ – соответственно радиусы

круга и детали, м. Для плоского шлифования $R_{\text{дет}} \rightarrow \infty$, тогда $h = \sqrt{2 \cdot t \cdot R_{\text{кр}}}$;

$\tau = \frac{\sqrt{2 \cdot t \cdot R_{\text{кр}}}}{V_{\text{дет}}} = \frac{t \cdot \sqrt{2 \cdot t \cdot R_{\text{кр}}}}{Q_{\text{уд}}}$, где $Q_{\text{уд}} = t \cdot V_{\text{дет}}$ – удельная производительность обработки, м²/с (т.е. приходящаяся на единицу ширины круга).

Принимая $2R_{\text{кр}} = 0,3$ м; $Q_{\text{уд}} = 600$ мм²/мин = 10^{-5} м²/с, $\lambda = 50$ Вт/(м·К); $c = 175,9$ Дж/(кг·К); $\rho = 15 \cdot 10^3$ кг/м³ (для алмазного шлифования твердого сплава ВК8), определим время τ для двух случаев: многопроходного ($t_1 = 0,01 \cdot 10^{-3}$ м) и глубинного ($t_2 = 10^{-3}$ м) алмазного шлифования, табл. 1.

Таблица 1

Расчетные значения параметров τ , l_2 , V_{θ} , $V_{\text{рез}}$, θ

Вид шлифования	τ , с	$l_2 \cdot 10^{-3}$, м	$V_{\theta} \cdot 10^{-3}$, м/с	$V_{\text{рез}} \cdot 10^{-3}$, м/с	θ , К
Многопроходное	0,00173	0,255	74	5,8	470
Глубинное	1,73	8,1	2,34	0,58	1500

Параметры l_2 и V_{θ} для двух случаев определяются в соответствии с зависимостями (5) и (7), табл. 1.

При расчете температуры резания θ по зависимости (4) неизвестным параметром является плотность теплового потока:

$$q = \frac{P_z \cdot V_{\text{кр}}}{B \cdot h} \cdot \bar{\psi}, \quad (8)$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н; $V_{\text{кр}}$ – скорость круга, м/с; B – ширина шлифования (ширина круга), м; $\bar{\psi}$ – коэффициент, показывающий какая часть энергии резания поглощается обрабатываемой деталью.

Тангенциальную составляющую силы резания P_z получим из известного соотношения [3]:

$$\sigma \cdot K_{рез} = 2 \cdot \sigma_{сж} = const, \quad (9)$$

рассматривая условное напряжение резания σ в виде $\sigma = P_z / S_{сум} = P_z \cdot V_{кр} / Q$, где $K_{рез} = K_{ш} = P_z / P_y$ – коэффициент резания (шлифования); P_y – радиальная составляющая силы резания, Н; $\sigma_{сж}$ – предел прочности обрабатываемого материала на сжатие, Н/м²; $S_{сум}$ – суммарная мгновенная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зёрнами, м²; Q – производительность обработки, м³/с. Тогда P_z выразится

$$P_z = \frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot Q}{K_{ш} \cdot V_{кр}}. \quad (10)$$

После подстановки зависимости (10) в (8), имеем

$$q = \frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot Q}{B \cdot h \cdot K_{ш}} \cdot \bar{\psi} = \frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot Q_{уд}}{h \cdot K_{ш}} \cdot \bar{\psi}, \quad (11)$$

где $Q_{уд} = Q / B$.

Следовательно, плотность теплового потока q тем больше, чем больше прочность обрабатываемого материала $\sigma_{сж}$, производительность обработки Q и чем меньше коэффициент резания при шлифовании $K_{ш}$ и длина дуги контакта круга с деталью h .

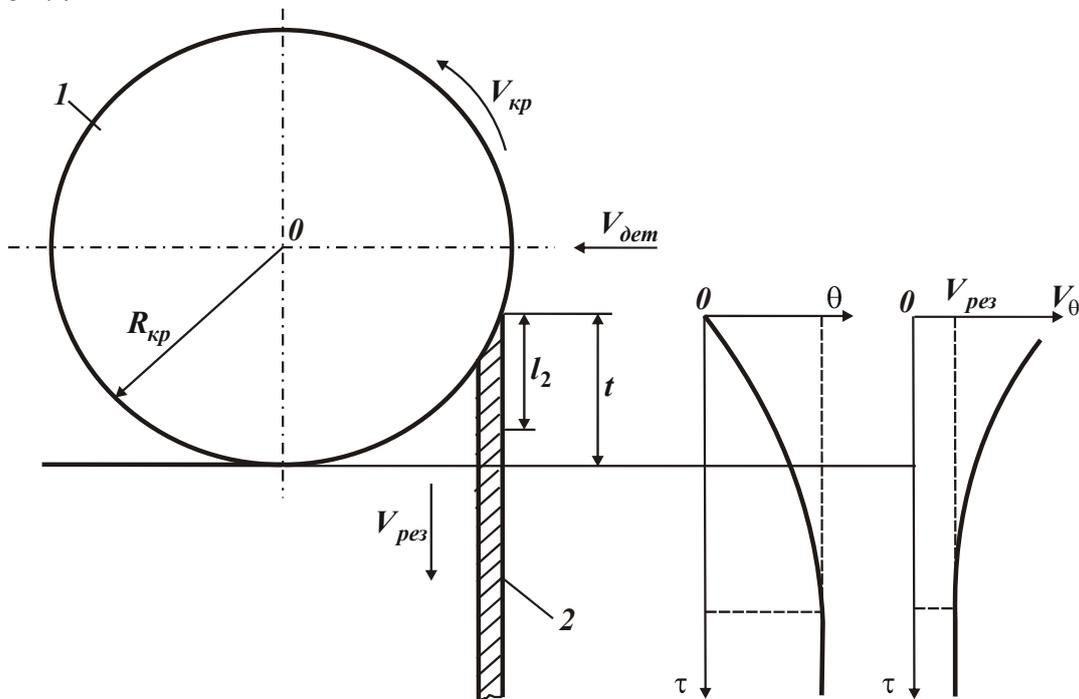


Рис. 1. Расчетная схема шлифования с учетом перерезания стержня: 1 – круг; 2 – стержень.

Для исходных значений: $\sigma_{сж} = 4 \cdot 10^9$ Н/м²; $Q_{уд} = 10^{-5}$ м²/с; $K_{ш} = 0,5$; $\bar{\psi} = 1$ рассчитаем температуру резания θ в соответствии с зависимостью (4) с учетом зависимости (11) для двух рассматриваемых случаев, табл. 1. Температура резания

при многопроходном алмазном шлифовании меньше, чем при глубинном алмазном шлифовании.

Определим теперь скорость $V_{рез}$ перерезания стержня длиной, равной глубине шлифования (рис. 1), т.е. $V_{рез} = t / \tau$. Результаты расчетов приведены в табл. 1 с учетом исходных данных для двух рассматриваемых случаев шлифования. Как видим, мгновенная скорость распространения тепла V_{θ} значительно больше скорости $V_{рез}$ перерезания стержня алмазным кругом. Поэтому для рассматриваемых условий шлифования процесс перерезания стержня при расчетах можно не учитывать. Достаточно ограничиться упрощенной расчетной схемой, не учитывающей перерезания стержней, и полученными упрощенными аналитическими зависимостями (4), (5) и (7).

Однако, данные зависимости будут справедливы для условий обработки, обеспечивающих выполнение неравенства $V_{\theta} > V_{рез}$. Как следует из зависимости (7), с увеличением временем τ скорость распространения тепла вглубь стержня V_{θ} непрерывно уменьшается и при определенных условиях она станет равной скорости $V_{рез}$, т.е. $V_{\theta} = V_{рез}$. В этом случае произойдет стабилизация теплового процесса вследствие того, что количество тепла, подводимого к стержню, станет равным количеству тепла, отводимого от стержня (за счет его перерезания).

При $V_{\theta} > V_{рез}$ количество подводимого тепла превышает количество отводимого тепла, т.е. практически все тепло, которое подводится к стержню, остается в нем и идет на его нагревание. Отвод тепла от стержня в этом случае практически отсутствует.

Из условия стабилизации теплового процесса (т.е. процесса нагревания стержня) $V_{\theta} = V_{рез}$ с учетом зависимости (7) определим время τ , которое по физической сущности соответствует времени теплового насыщения стержня:

$$\tau = \frac{\lambda}{2 \cdot c \cdot \rho_m \cdot V_{рез}^2}. \quad (12)$$

Как видим, время τ тем меньше, чем больше скорость перерезания стержня $V_{рез}$.

Подставим зависимость (12) в зависимости (5) и (4):

$$l_2 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho_m \cdot V_{рез}}, \quad (13)$$

$$\theta = \frac{q}{c \cdot \rho_m \cdot V_{рез}}. \quad (14)$$

Плотность теплового потока q , возникающего при перерезании стержня со скоростью $V_{рез}$, можно представить как

$$q = \frac{P_{z1} \cdot V_{кр}}{S} = \sigma \cdot \frac{Q}{V_{кр}} \cdot \frac{V_{кр}}{S} = \sigma \cdot V_{рез}, \quad (15)$$

где P_{z1} – тангенциальная составляющая силы резания, Н; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с; S – площадь поперечного сечения стержня, м²; σ – условное напряжение резания

при шлифовании, $\text{H}/\text{м}^2$; $Q = S \cdot V_{рез}$ – производительность процесса перерезания стержня, $\text{м}^3/\text{с}$.

Тогда зависимость (14) примет вид:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho_m} \quad (16)$$

или с учетом соотношения (9):

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{c \cdot \rho_m \cdot K_{ш}} \quad (17)$$

Из зависимостей (16) и (17) следует, что температура θ определяется лишь одним переменным параметром σ (или коэффициентом шлифования $K_{ш}$), т.е. зависит главным образом от режущей способности круга. Чем выше режущая способность круга, тем меньше температура θ и наоборот. В табл. 2 приведены расчетные значения параметров τ , l_2 и θ , полученные на основе зависимостей (12), (13) и (17) с учетом приведенных выше исходных данных для плоского алмазного шлифования твердого сплава ВК8.

Таблица 2

Расчетные значения параметров τ , l_2 , $V_{\theta} = V_{рез}$, θ

Вид шлифования	τ , с	$l_2 \cdot 10^{-3}$, м	$(V_{\theta} = V_{рез}) \cdot 10^{-3}$, м/с	θ , К
Многопроходное	0,28	3,27	5,8	6064
Глубинное	28,2	32,67	0,58	6064

Как видим, параметры τ , l_2 и θ принимают весьма большие значения, не свойственные процессу шлифования. Следовательно, в реальных условиях шлифования стабилизация теплового процесса (процесса нагревания стержня) не происходит, т.е. не достигается тепловое насыщение поверхностного слоя обрабатываемого материала детали в силу кратковременности контакта шлифовального круга с фиксированным стержнем. Процессы шлифования (так же как и все процессы резания) осуществляются в неустановившемся тепловом режиме, благодаря чему фактические значения температуры резания значительно меньше температуры θ установившегося теплового процесса, табл. 2.

Таким образом, в работе показано, что с увеличением времени контакта шлифовального круга увеличение температуры резания не беспредельно, оно ограничено, что в известных решениях по теплофизике резания и шлифования не раскрыто. Характер изменения скорости распространения тепла вглубь стержня V_{θ} и температуры θ с течением времени τ перерезания стержня со скоростью $V_{рез}$ показан на рис. 1. Как видим, первоначально скорость V_{θ} уменьшается, а температура θ увеличивается. При достижении условия $V_{\theta} = V_{рез}$ тепловой процесс стабилизируется: скорость V_{θ} и температура θ с течением времени τ остаются неизменными.

Таким образом показано, что при анализе теплового процесса при шлифовании можно пользоваться упрощенной расчетной схемой, не учитывающей перерезание стержней, и упрощенными аналитическими зависимостями (4), (5), (6) и (7),

определяющими три основные теплофизические характеристики резания: θ , l_2 и V_θ . Анализ зависимости (4) показывает, что температура θ тем больше, чем больше параметры q и τ (при заданных постоянных λ , c и ρ_m). Следовательно, добиться снижения θ можно за счет уменьшения времени теплового воздействия на элементарную площадку обрабатываемой поверхности S и уменьшения плотности теплового источника q , являющегося обобщенной характеристикой параметров режима шлифования и т.д. Параметр l_2 определяет толщину «прогретого» поверхностного слоя материала. В отличие от температуры резания θ , длина l_2 вполне однозначно определяется одним переменным параметром τ : чем он больше, тем больше l_2 .

Скорость распространения тепла V_θ с течением времени обработки τ уменьшается, что, собственно, является следствием нелинейности зависимости θ от τ .

Учитывая определяющую роль параметра τ в формировании теплофизических параметров резания, процессы шлифования могут быть классифицированы по длительности теплового воздействия на обрабатываемую деталь. Наиболее очевидный путь снижения τ – это увеличение скорости перемещения теплового источника, равного скорости детали V_{dem} , тогда время τ определится $\tau = h/V_{dem}$, где h – длина дуги контакта круга с деталью, м. Длина l_2 , в соответствии с зависимостью (5), уменьшится, и вся теплота будет концентрироваться в небольшом объеме поверхностного слоя материала. В связи с этим важно не допустить значительного повышения температуры резания θ за счет увеличения плотности теплового источника q , т.к., учитывая небольшой объем материала, в котором концентрируется тепло, это может привести к его значительному нагреву (а значит к линейному расширению) и появлению сетки микротрещин и других тепловых дефектов при охлаждении.

Таким образом показано, что первым основным путем управления временем τ и соответственно температурой резания θ является регулирование параметрами режима шлифования. Вторым путем, получившим широкое распространение в металлообработке, следует рассматривать искусственное прерывание процесса за счет использования специальных прерывистых кругов, выполненных в виде чередующихся выступов и впадин. Тогда при одинаковом (заданном) значении плотности теплового источника q за счет изменения τ можно в широких пределах изменять θ , как это следует из зависимости (4). Следовательно, все процессы шлифования по тепловому признаку могут быть разделены на две группы. Первая группа будет включать процессы, в которых время теплового воздействия τ и плотность q взаимосвязаны режимом шлифования (процессы многопроходного, глубинного, скоростного шлифования и другие). Вторая группа – это процессы, в которых параметры τ и q не взаимосвязаны (это процессы прерывистого шлифования).

В плане снижения температуры резания θ процессы второй группы, несомненно, более прогрессивны, т.к. позволяют изменять параметры τ и q независимо друг от друга. Остановимся первоначально на анализе процессов,

отнесенных к первой группе, т.е. процессов обычного шлифования. С учетом $\tau = h/V_{дет}$ зависимость (4) выразится:

$$\theta = q \cdot \sqrt{\frac{2h}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m \cdot V_{дет}}} \quad (18)$$

Окончательно зависимость для определения температуры резания θ получим, подставляя вместо q в зависимость (18) выражение (11):

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot Q}{B \cdot h \cdot K_{ш}} \cdot \bar{\psi} \cdot \sqrt{\frac{2h}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m \cdot V_{дет}}} \quad (19)$$

Из зависимости (19) следует, что добиться уменьшения температуры резания θ при фиксированной производительности обработки Q можно путем увеличения параметров h , $K_{ш}$ и $V_{дет}$. Очевидно, наибольшее влияние на θ при $Q = const$ будет оказывать коэффициент шлифования $K_{ш}$, входящий в зависимость (19) из всех переменных параметров с наибольшей степенью. Следовательно, применение кругов, работающих в режиме самозатачивания (алмазные круги на органических и керамических связках), или применение методов электрофизикохимической правки алмазных кругов на металлических связках, обеспечивающих их высокую режущую способность и увеличивающих коэффициент шлифования $K_{ш}$, будет способствовать снижению температуры резания.

Увеличение h предполагает увеличение глубины шлифования t по зависимости

$$h = \sqrt{\frac{2 \cdot t}{\rho}} \quad (20)$$

где $\rho = \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}}$; $R_{кр}$, $R_{дет}$ – соответственно радиусы круга и детали, м.

После подстановки зависимости (20) в зависимость (19), с учетом $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$, имеем

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot Q}{B \cdot K_{ш}} \cdot \bar{\psi} \cdot \sqrt{\frac{1}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho \cdot B}{Q \cdot V_{дет}}} \quad (21)$$

Как видим, при $Q = const$ с увеличением $V_{дет}$ температура резания уменьшается. Следовательно, эффективно обработку производить с небольшой глубиной шлифования и относительно высокой скоростью детали. В случае, если увеличением параметров $K_{ш}$ и $V_{дет}$ невозможно достичь снижения температуры резания до требуемого уровня, следует уменьшать производительность обработки, которая почти прямо пропорционально связана с температурой резания.

Таким образом показано, что при обычном шлифовании задача снижения температуры резания решается практически двумя путями – увеличением $K_{ш}$ и снижением производительности. Третьим, но менее эффективным, путем следует рассматривать увеличение $V_{дет}$ до предельного значения, реализуемого на станке, при пропорциональном уменьшении глубины шлифования.

В расчетную зависимость (21) не входит скорость круга $V_{кр}$. Ее влияние на температуру резания θ проявляется через коэффициент шлифования $K_{ш}$.

Экспериментально установлено, что с увеличением $V_{кр}$ коэффициент шлифования $K_{ш}$ уменьшается. Следовательно, с увеличением $V_{кр}$ температура резания θ будет

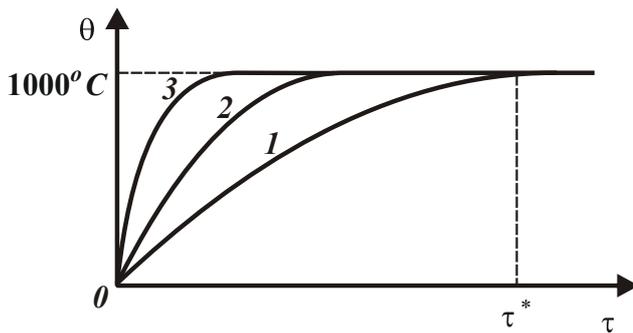


Рис. 2. Примерная зависимость θ от τ для разных скоростей резания V ($V_1 < V_2 < V_3$).

увеличиваться. В обобщенном виде зависимость (21) с учетом зависимости (9) применительно к плоскому шлифованию примет вид:

$$\theta = \sigma \cdot t^{0,75} \cdot \left(\frac{2 \cdot V_{дет}}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m \cdot \sqrt{D_{кр}}} \right)^{0,5} \cdot \bar{\psi}, \quad (22)$$

где $D_{кр}$ – диаметр круга, м.

Из зависимости следует, что наибольшее влияние на θ оказывает

условное напряжение резания σ и в меньшей мере – глубина шлифования t и скорость детали $V_{дет}$.
Анализируя приведенные зависимости для определения температуры резания при шлифовании, видим, что добиться существенного уменьшения температуры резания можно за счет увеличения коэффициента шлифования $K_{ш}$. Вместе с тем, как известно, этот коэффициент не превышает значения 1. В этом ограниченность технологических возможностей шлифования. Существенно увеличить коэффициент $K_{ш}$ можно в условиях резания лезвийным инструментом. Коэффициент $K_{ш}$ в этом случае называют коэффициентом резания $K_{рез}$ и он принимает значения в пределах 1...10. Тогда, следуя зависимости (17), температура θ теплового насыщения перерезаемого стержня (которыми условно представлен обрабатываемый материал) уменьшится в 10...20 раз и будет принимать значения, изменяющиеся приблизительно в пределах до 1000°C, что соответствует практике резания. График изменения температуры θ от времени нагревания перерезаемого стержня τ показан на рис. 2.

Исходя из соотношения (9), увеличение коэффициента резания в 10...20 раз предполагает уменьшение в такое же количество раз условного напряжения резания σ , т.е. эффект снижения температуры резания обусловлен существенным уменьшением σ (по сути уменьшением энергоемкости процесса резания).

Рассмотрим, как изменятся параметры τ и l_2 , определяемые зависимостями

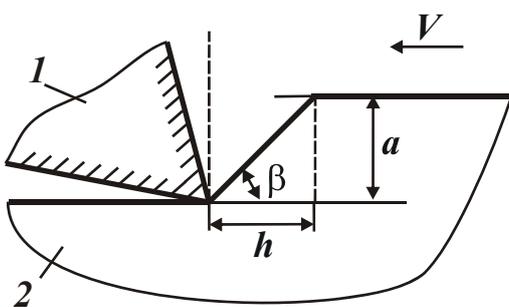


Рис. 3. Расчетная схема процесса резания: 1 – резец; 2 – обрабатываемый материал.

(12) и (13), при резании лезвийным инструментом. Входящую в обе зависимости скорость перерезания стержня $V_{рез}$ определим как:

$$V_{рез} = \frac{a}{\tau_1} = a \cdot \frac{V}{h} = V \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (23)$$

где a – толщина среза, м; τ_1 – время перерезания стержня, с; V – скорость резания, м/с; β – условный угол сдвига обрабатываемого материала; h – длина зоны резания, охваченной плоскостью сдвига материала ОА, рис. 3.

Как видим, скорость $V_{рез}$ почти пропорционально зависит от скорости V , считая, что $tg\beta$ при этом изменяется мало. При $V=2$ м/с и $\beta=45^\circ$, имеем $V_{рез}=2$ м/с, т.е. скорость перерезания стержня $V_{рез}$ при резании многократно (до 1000 раз и более) превышает аналогичную скорость при шлифовании. Это соответствует такому же уменьшению параметра l_2 и еще более существенному уменьшению времени τ (времени теплового насыщения обрабатываемого материала). Параметры τ и l_2 для условий резания лезвийным инструментом опишутся:

$$\tau = \frac{\lambda}{2 \cdot c \cdot \rho_m \cdot V^2 \cdot tg^2 \beta}, \quad (24)$$

$$l_2 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho_m \cdot V \cdot tg \beta}. \quad (25)$$

Чем больше скорость резания V , тем меньше параметры τ и l_2 .

Таким образом, при резании лезвийным инструментом полностью реализуются условия теплового насыщения обрабатываемого материала, т.е. справедлив график, показанный на рис. 2. При изменении времени от 0 до значения τ^* , определяемого по сути зависимостью (24), температуру резания θ необходимо рассчитывать по зависимости (4), а при $\tau > \tau^*$ – по зависимости (16). Преобразуем зависимость (4) применительно к резанию лезвийным инструментом, рассматривая в ней $\tau = \tau_1 = h/V$. Плотность теплового потока q определится

$$q = \frac{N}{F} = \frac{P_z \cdot V}{b \cdot h} = \sigma \cdot a \cdot b \cdot \frac{V}{b \cdot h} = \frac{\sigma \cdot a \cdot V}{h}, \quad (26)$$

где b – ширина среза, м.

Тогда

$$\theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot a \cdot V \cdot tg \beta}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m}}. \quad (27)$$

Как видим, температура резания θ в одинаковой степени зависит от толщины среза a и скорости резания V . С их увеличением температура будет увеличиваться (в пределах действия зависимости (27)), а затем будет оставаться неизменной (в пределах действия зависимости (16)). Данный характер изменения температуры резания от параметров a и V соответствует практическим результатам.

Таким образом, в работе предложен новый упрощенный инженерный подход к расчету и анализу температуры резания и температуры поверхностного слоя обрабатываемой детали при механической обработке.

Литература: 1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с. 2. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 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 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.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АБРАЗИВНО-ШЛИФОВАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ

Дудин А.Т. (г. Евпатория, Украина)

Theoretical substantiation of conditions of increase of efficiency of abrasive grinding processing.

Обкатка. Можно ли использовать обкатку при абразивно-шлифовальной обработке? Если рассматривать вопрос обкатки с точки зрения обыкновенных шлифовальных кругов и технологий, то это действительно не перспективно. Почему? Если катать круг по мягкой поверхности детали, то на ней образуются вмятины и наросты, т.е. происходит процесс, обратный шлифованию. Вместо уменьшения шероховатости происходит ее увеличение. Если катать круг по твердой и хрупкой поверхности детали, то на ней от острых зерен так же будут оставаться следы, которые видны при увеличении, т.е. шероховатость возрастает. При этом острые зерна на круге притупляются, и круг с каждым оборотом оставляет все меньше и меньше следов. Рассмотрим более подробно этот вопрос.

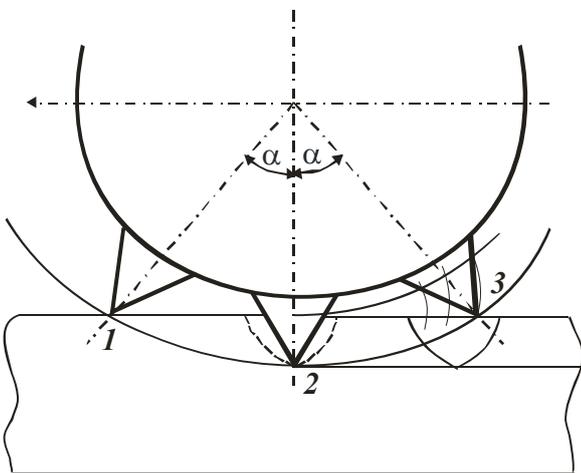


Рис. 1. Схема обкатки.

Представим, что на алмазном круге находятся зерна, имеющие форму конуса с углом при вершине 60° , которые не выкрашиваются. При обкатке таким кругом получаются в сечении параболические следы, рис.1 (стрелкой показано направление обкатки). Зуб в точке 1 касается поверхности под углом α , выходит в точке 3 под углом α к нормали поверхности, т.е. при обкатке меняет угол атаки, который составляет 2α . Очевидно, если зуб внедряется в зерно или межзеренное пространство и при этом меняет свой угол, то этот факт благоприятен для

разрушения поверхности. Кроме того, зуб перемещается по кривой и, приходя в точку 2, оставляет определенное пространство - между зубом и боковой поверхностью (за зубом). Перед зубом во время вдавливания происходит смятие материала. Чем выше текучесть материала, тем легче ему выйти из-под зуба в межзеренное пространство. Чем хрупче материал, тем он быстрее перед зубом превращается в порошок и ему легче выйти в межзеренное пространство, т.е. тем больше и легче разрушается поверхность вокруг зуба. В точке 2 вершина зуба на мгновение остановилась, и вращение началось вокруг нее.

Пространство за зубом от вершины до поверхности свободно по дуге, и разрушение идет корнем зуба поверхностной кромки, т.е. приложение сил на какое-то время резко изменилось, кромка поверхности начинает разрушаться. Если материал пластичный, то большая часть его вытесняется в межзеренное пространство. Если материал хрупкий, то он превращается в порошок. Разрушение кромки поверхности в этом случае – факт положительный. Далее начинает двигаться вершина зуба по дуге к поверхности детали. Здесь имеет место вырывание зерен и резание металла. Так как процесс идет из глубины металла к поверхности, то он протекает с небольшими энергетическими затратами, и процесс разрушения металла (материала) можно считать положительным. Очевидно, больше энергетических затрат происходит во

время перемещения зуба из точки 1 в точку 2, чем из точки 2 в точку 3.

Таким образом, обкатка, как процесс разрушения поверхности, может иметь место при абразивно-шлифовальной обработке при определенных условиях: 1) если зубья имеют острую коническую форму; 2) если обрабатываемый материал пластичный и текучий; 3) если обрабатываемый материал хрупкий; 4) если обкатка применяется как вспомогательный метод при шлифовании. Проведем анализ этих условий. Как обеспечить зубьям острую коническую форму? Понятно, что применять для обкатки абразивные круги на металлической связке нецелесообразно, т.к. процесс затупления зерен весьма не продолжительный, и дальнейшая обкатка теряет смысл. Следовательно, для обкатки нужны специальные круги с пористой и достаточно хрупкой связкой. К сожалению, такие круги для обкатки пока не изготавливаются.

А можно ли производить обработку обкаткой теми кругами, которые уже есть? Можно, если к обкатке добавить осевые перемещения круга, т.е. добавить чистую резку, в результате которой будет происходить самозатачивание зерен. Это можно выполнить с помощью ультразвукового вибратора. Такая обработка становится в несколько раз эффективнее, и она по праву займет свое место в обработке. Это новый вид обработки материалов, соединяющий два метода разрушения: клиновое разрушение и резание материала.

Почему предпочтительнее обрабатывать методом обкатки пластичные и текучие материалы? Потому что пластичные материалы разрушаются легче клином, чем резанием. Большинство металлов и сплавов (пластичных и текучих) при быстрой деформации получают наклеп, и тогда, следом за обкаткой, обработка абразивным кругом значительно облегчается, т.к. обкатка обеспечила прерывистое резание.

Кроме того, вытесненный металл получил наклеп, стал хрупким и не склонен к налипанию на абразивный круг.

Почему имеет смысл обрабатывать методом обкатки хрупкие материалы? Да потому, что клин для разрушения хрупкого материала эффективнее, чем резец (так как резец производит резание и скалывание хрупкого материала, а клин дает трещины, что при разрушении материала более эффективно).

Почему обкатку можно применять как вспомогательный метод при шлифовании? Потому что процесс обкатки – это процесс разрушения поверхности и как самостоятельный вид обработки может применяться крайне редко (для увеличения шероховатости). Но, как вспомогательный метод при шлифовании, он найдет наибольшее применение, потому что обеспечит более эффективную обработку, увеличит производительность и снизит себестоимость продукции выпускаемой продукции, позволит продлить срок дорогостоящим алмазным шлифовальным кругам.

На основании сказанного можно сделать

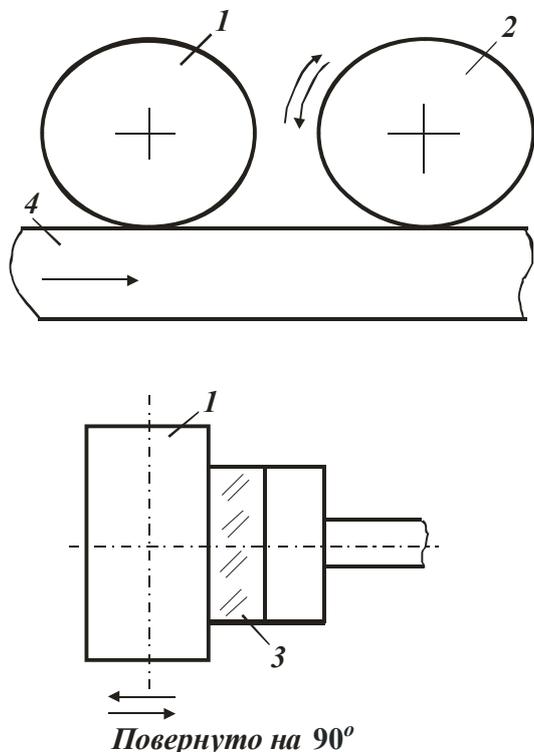


Рис. 2. Схема обкатки при абразивно-шлифовальной обработке: 1 – обкаточный круг; 2 – шлифовальный круг; 3 – вибратор, приводящий в движение обкаточный круг; 4 – обрабатываемая деталь.

вывод. Как правило, обработка обкаткой должна вестись непосредственно перед шлифованием, а при снятии больших припусков – одновременно с ним. Следовательно, нужны новые обкаточно-шлифовальные инструменты. Процесс обкатки должен осуществляться с ультразвуковой осевой вибрацией. Для этого эффективнее использовать тепловую энергию, затрачиваемую на нагрев металла, процесс необходимо соединить с процессом одновременного шлифования. Для этого нужен новый инструмент: обкаточно-вибрационно-шлифовальный.

Для разрушения некоторых пластичных материалов методом обкатки при шлифовании, обкаточно-вибрационный круг необходимо изготавливать из износостойчивого сплава (вместо зерен - конусные шипы). Зерна шлифовального алмазного круга, проходя за обкаточно-вибрационным кругом, облегчают процесс резания, т.к. они проходят через выдавленные канавки и риски от вибрации (т.е. получается прерывистое шлифование), при этом снимают выдавленный материал.

При обработке хрупкого материала в нем остаются микротрещины, которые облегчают процесс резания. Вибрации накладываются на обкаточный круг (при этом не требуется высокая точность и качество обработки), а шлифовальный круг, следуя за обкаточным, обеспечивает высокие показатели точности и качества обработки, рис. 2.

Вибрации могут создаваться не только на обкаточном, но и на шлифовальном круге, а также на обрабатываемой детали. Вибрации на обкаточном и шлифовальном кругах и детали могут производиться в трех плоскостях. Кроме того, при обработке можно осуществлять возвратно-поворотные движения кругами. Представляет интерес ударно-прерывистая обкатка, а также прерывистая обкатка с прерывистым шлифованием.

Преимущества вибрационно-абразивно-шлифовальной обработки. Преимущество вибрационно-абразивно-шлифовальной обработки перед прерывистым шлифованием заключается в том, что работающие зерна практически не теряют контакта с обрабатываемой поверхностью, а если и теряют, то на очень малое расстояние и очень малый промежуток времени. Поэтому в момент входа и выхода зерен имеет место практически один и тот же тепловой режим. При прерывистом шлифовании этот режим резко отличается. При определенных условиях резания некоторых материалов прерывистыми кругами может возникнуть ситуация, когда зерна выходят из контакта, оставляя материал, оптимальный (по температуре) для резания, который затем охлаждается, а зерна, ударяющиеся об обрабатываемый материал, встречаются со структурой, практически близкой к закаленной. При обработке прерывистыми кругами количество зерен значительно меньше, т.к. меньше рабочая поверхность круга. Поэтому зерна в процессе работы нагружаются по-разному – от ударной нагрузки до главного врезания на оптимальную глубину и работают в одностороннем направлении, т.е. режущие кромки остаются одни и те же на определенном промежутке времени – пока не изменится их геометрия в результате износа, сколов, выкрашиваний и т.д. При прерывистом шлифовании нарост расплавленного металла значительно ниже, чем при обычном шлифовании, но все-таки он имеет место. При вибрационном шлифовании нарост расплавленного металла на зерне не образуется.

Причины возникновения автоколебаний и обеспечение вибрационной обработки. Проблема автоколебаний при шлифовании является одной из нерешенных, от которой зависит, прежде всего, качество обработки (недопущение брака), производительность, стойкость инструмента. Возникновение автоколебаний – процесс естественный для шлифования, который образуется от следующих факторов:

неоднородности массы круга, отклонений от геометрических размеров и формы круга, балансировки и посадки круга, биений шпинделя, вибраций стола, упругих деформаций вала, детали, неодинаковой твердости обрабатываемого материала, переменности припуска обработки, больших поперечных сечений стружки, затупления и засаливания круга. Все эти вибрации находятся в области собственных колебаний системы и периодичности вращения двигателя, передаточных механизмов, круга. Такие колебания при обработке, как правило, неизбежны. Если посмотреть на процесс обработки отдельным зерном, то его можно назвать случайным. Он, как правило, несет ударную нагрузку неожиданно, бессистемно, т.к. частота его лежит в дозвуковых частотах и связана, как правило, с оборотом круга (некоторым числом оборотов круга). Геометрия обрабатываемой поверхности для следующего зерна практически не изменяется.

Поэтому эти процессы могут влиять как отрицательно, так и положительно на качество обрабатываемой поверхности детали, производительность и стойкость инструмента. В таких единичных вибрациях все зависит от амплитуды колебания. Но, к сожалению, на практике мы не можем управлять данными вибрациями и, при определенных режимах обработки, отдельные упругие деформации и вибрации отдельных узлов начинают входить в резонанс с собственными колебаниями всей системы. В этом случае резонансная амплитуда колебаний приводит к ухудшению качества и точности обрабатываемой поверхности, идет интенсивное разрушение зерен круга, их выкрашивание. Конечно, об увеличении производительности и качества обработки, стойкости инструмента в этом случае говорить не приходится. Возникающие автоколебания при любой обработке наносят вред. Методам борьбы с автоколебаниями посвящено много работ, которые действительно обеспечили понятие сущности этого явления и дали математические расчеты для уменьшения его интенсивности.

Рассмотрим причины возникновения автоколебаний с учетом характеристик обрабатываемой поверхности. При автоколебаниях круга происходит образование волнистой поверхности. Если рассматривать систему вибраций, возникающую естественно, и оценивать как она влияет на процесс обработки, то даже при всех положительных случайностях, ее надо отнести к отрицательным явлениям, как и возникающие автоколебания, поскольку любые колебания с любой амплитудой, которыми мы не управляем, могут привести только к случайному улучшению качества, производительности и увеличению стойкости инструмента.

Вибрации, которые можно создавать с определенной частотой и которые будут автоматически подбираться для оптимальной обработки – для гашения частот собственных колебаний системы, будут способствовать предотвращению возникновения автоколебаний, улучшению качества, производительности и стойкости инструмента.

Если рассматривать систему автоколебаний и оценивать, как она влияет на обрабатываемую поверхность, то можно обнаружить, что с определенных частей поверхности материал удален в больших объемах, а с других – остался практически нетронутым. Это явление автоколебаний и следует использовать в процессе обработки, т.е. создавать автоколебания круга искусственно с разными периодами. Тогда вся поверхность может быть обработана с повышенной производительностью и лучшим качеством. Речь идет об управлении процессом таким образом, чтобы инструмент сам реагировал на процесс обработки и колебания, а с помощью обратной связи изменял их для получения оптимальных режимов обработки. Для этого нужны новые конструкции шлифовальных систем и кругов.

Таким образом, при внимательном изучении отрицательных явлений при шлифовании их можно перевести в положительные. Волновая выемка материала в одном положении круга при автоколебаниях переводится и распространяется по всей обрабатываемой поверхности управляемыми вынужденными колебаниями звуковых и ультразвуковых частот, а применение обратной связи делает этот процесс автоматически управляемым с выбором оптимального режима обработки.

Абразивно-шлифовальная обработка с наложением ультразвуковых колебаний на среду. В настоящее время без особых затрат на оборудование и инструмент в абразивно-шлифовальной обработке можно применять ультразвуковые колебания непосредственно на среду, в которой производится такой вид работ. В этом случае сила воздействия ультразвуковых колебаний примерно обратно пропорциональна квадрату расстояния до места обработки (воздействия).

Наложение ультразвуковых колебаний на среду не гарантирует колебаний круга или детали с определенной амплитудой. Поэтому говорить о шлифовании с применением ультразвука в этом случае можно условно. Да, ультразвук, наложенный на среду, в которой происходит обработка, очень положительно влияет на качество обработки, и здесь есть большие резервы для совершенствования, но выдавать это за ультразвуковую обработку шлифованием, не стоит.

При чистой ультразвуковой обработке должны перемещаться круг или деталь, или круг и деталь одновременно с определенными амплитудами, с определенными частотами и в определенных плоскостях. Предположим, что среда обработки – воздух. Выполняется процесс плоского шлифования периферией круга. Ультразвуковые волны можно направить на периферию круга параллельно плоскости поверхности шлифования. Ультразвуковые волны, передаваемые через воздух, окажут некоторое воздействие на сжатие и растяжение круга, вибрацию зерен в круге, окажут воздействие на изгиб вала (если применяется СОЖ, то и на нее). Воздействие ультразвуковых колебаний на СОЖ одно из самых заметных и ощутимых. СОЖ лучше проникает в зону обработки, лучше удаляет стружку из зоны обработки и с поверхности круга, при определенных воздействиях образуется кавитация жидкости, которая также способствует обработке. Воздействие на круг и обрабатываемую поверхность будет минимальным, и говорить об амплитуде колебаний без современных методов измерения очень сложно.

Ультразвуковые колебания могут направляться на боковую поверхность круга параллельно плоскости обрабатываемой поверхности, воздействия ультразвука происходят сбоку на зерна, на большую боковую поверхность круга и на СОЖ, если она применяется. Так как боковая поверхность круга больше, то могут возникнуть упругие деформации круга и вала. В зависимости от материала круга, может произойти и разрушение круга.

Рассмотрим еще направленное действие ультразвуковых колебаний через воздух на круг сверху, перпендикулярно плоскости обрабатываемой поверхности. Ультразвуковые колебания в этом случае воздействуют на периферию круга, обрабатываемую поверхность и СОЖ, если она применяется. Такие воздействия могут направляться под любым углом. Ими можно воздействовать на любую среду, в которой идет обработка. Если обработка ведется в кислороде, водороде, углекислом газе, азоте, инертном газе или другой среде, то ультразвуковые воздействия через среду будут совершенно разными. Для того чтобы увеличить ультразвуковые воздействия, необходимо увеличить давление (плотность) среды. Отсюда следует, что абразивно-

шлифовальную обработку возможно перенести полностью в жидкую среду, например, в керосин, воду, масло и т.д. Вода плотнее воздуха в 800 раз, поэтому передача ультразвуковых колебаний и их воздействие на обработку значительно увеличится.

Абразивно-шлифовальную обработку с наложением ультразвука через среду можно производить поочередно по плоскостям, с разных точек или одновременно. Вариантов таких наложений может быть очень много. Применение ультразвука с наложением его через воздух несомненно повышает результаты обработки, однако очень сложно их зафиксировать и доказать эффективность затраченной энергии на вибрацию. Затраты на ультразвук, качество и снижение себестоимости – это те факторы, которые определяют эффективность обработки, но которые еще мало изучена.

Кроме того, этот метод имеет перспективные направления развития, если круг устанавливать не по жесткой схеме, а по упругой подвижной схеме. Воздействие ультразвукового вибратора можно изменить не только изменением угла, расстояния или мощности и частоты воздействия, но и с помощью изменения плотности среды. На сам вибратор могут накладываться вибрационные воздействия, импульсивно изменяться давление среды и другие факторы, которые при конструкции подвижно-упругих кругов обеспечат шлифование самых твердых материалов с получением высоких показателей производительности, качества и снижением себестоимости обработки.

Каждый вид и метод абразивно-шлифовальной обработки имеет свои эффективные области применения. При обработке одних материалов он может быть выгоднее всех других. С другой стороны, передача ультразвуковых колебаний через среду не столь эффективна, как передача их непосредственно на шлифовальный круг при полном прямом контакте. На основе сказанного можно заключить, что абразивно-шлифовальная обработка с наложением ультразвуковых колебаний на среду заслуживает более глубокого изучения для повсеместного эффективного применения в народном хозяйстве. Требуются новые подходы к применению сред и изменению их плотности, к замене жесткого крепления круга на упруго-подвижное. Нужны новые методы измерения параметров вибраций и качества обработки для применения многоточечных источников вибрации. Необходимо разрабатывать и создавать новое оборудование для прямой передачи ультразвуковых вибраций на круг.

Ультразвуковое шлифование. В технической литературе, как правило, большинство авторов утверждают, что обработка резанием с применением ультразвука, в том числе и шлифованием, намного эффективнее и производительнее. При этом нет схем шлифования с применением ультразвука, не производится инструмент, на который воздействует ультразвук. Поэтому наложение ультразвуковых колебаний при электроискровом алмазном шлифовании и шлифовании другими видами не дают представления об используемом инструменте обработки. При неизвестном инструменте не приводятся данные по амплитуде колебаний, частоте колебаний и направлению колебаний. А если речь идет о колебаниях в нескольких плоскостях, то какими способами они достигаются и как согласовываются между собой? Если допустить, что обработка ведется кругом, тогда необходимо знать диаметр круга, скорость вращения, место приложения колебаний, направление колебаний, частоту и амплитуду колебаний. Как учитываются колебания системы, защищается ли деталь и круг от этих колебаний? Если защищается, то как? Следовательно, о пути резца в пространстве мало что известно: скорость резца не известна, изменение направления угла резания не известно, силы, действующие на резец на разных участках пути, не известны. В ряде работ применяется выражение "...при наложении ультразвука, по-

лучаем значительный эффект”. Прежде всего, надо разобраться, куда и как “накладывается” ультразвук. Если приложить ультразвуковой вибратор с мощностью 0,2 кВт к массе в 1 тонну и к массе в 1 кг, то, наверное, результат будет совершенно разный. Массу в 1 тонну вибратор колебать не сможет и, в лучшем случае, ультразвук просто превратится в тепловую энергию. А массу в 1 кг такой вибратор может колебать с определенной частотой и амплитудой. Поэтому, когда говорят об ультразвуковых колебаниях сразу в трех пространственных направлениях, то понятно, что при существующих кругах и приспособлениях ультразвуковую вибрацию одного абразивного круга сделать очень проблематично, а следовательно, надо вибрацию накладывать на другие узлы или механизмы шлифования. Если предположить, что вибрация осуществляется от одного вибратора, то, как установить амплитуду и частоту колебаний, так как массы узлов разные? Если вибрация осуществляется разными вибраторами, то, как они согласуются с собственными колебаниями системы?

При существующих кругах и способах их крепления на станке, получить согласованные одинаковые по амплитуде колебания в трех плоскостях практически невозможно. Задача математически неопределенная, т.к. нет совершенно одинаковых индукторов. Индукция и самоиндукция на одинаковых вибраторах будет на больших частотах отличаться, система внесет резонансные коррективы в эти колебания, т.к. собственные колебания системы в трех плоскостях пространства разные и система будет работать по своим законам.

В каждой плоскости есть свои автоколебания, которые могут вызвать резонансы на определенных гармониках и каждая плоскость внесет корректировку в другую плоскость своими резонансами. Математически можно описать систему уравнений с помощью неопределенных интегралов по плоскостям, но решить ее чрезвычайно сложно. К тому же даже в интегральных уравнениях по плоскостям нельзя учесть все, например, неоднородность обрабатываемого материала, неоднородность круга, случайные толчки, заклинивания в механизмах, колебания электрического тока, колебания магнитных полей, колебания подачи СОЖ и т.д. Без схемы подключения ультразвуковых колебаний делать расчеты совершенно бессмысленно даже применительно к одной плоскости. К тому же надо максимально изолировать вынужденную вибрацию от собственных вибраций.

При применении ультразвуковых колебаний надо воздействовать в них как можно меньшую массу, отключив ее от остальной системы. В идеале каждое зерно по отдельности должно участвовать в ультразвуковых колебаниях. Такой вид ультразвуковой обработки известен. Это когда под ударный инструмент ультразвукового вибратора вдуваются или вводятся эмульсией абразивные частицы, и инструмент вибратора ударяет по ним, изменяя направление их движения, т.е. направляет их на обрабатываемую деталь.

Недостаток такой обработки заключается в том, что под удар ультразвукового вибратора попадает очень мало зерен, и они подвергают износу ударную часть вибратора, а еще часть зерен разрушается при ударе об инструмент, т.е. далеко не все частицы даже из тех, что попали под удар, достигают цели.

Удар инструмента приходится на разные поверхности, поэтому направление силы удара и движение частиц не всегда перпендикулярно обрабатываемой поверхности. А это значит, что коэффициент полезного действия такой обработки низкий. Отсюда следует, что лучшее положение – когда участвует в ультразвуковой обработке не вся система, а по возможности минимальная часть ее с максимальной изо-

ляцией от всей системы, т.е. абразивный круг или его часть, где объединена в одно целое часть зерен, которые связаны между собой и приводятся в ультразвуковые колебания. Поэтому говорить о массовом применении ультразвуковой обработки в шлифовании можно тогда, когда появятся соответствующие приспособления, устройства и специальные абразивные круги. Кроме того, вибрационную часть можно не только колебать в трех плоскостях, но и подвергать крутильным колебаниям.

УДК 621.91-755

РАСЧЕТ ВИБРАЦИЙ В ПРОЦЕССЕ ТОЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ ПСЕВДОАНАЛОГОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Прево И.Д., Хавин В.Л. (г. Харьков, Украина)

The problems of vibration in the metal turning are considered in this work. The calculations of dependence of amplitude of vibrations from the construction and technological parameters of the system were conducted. As the mean of decision the system Simulink was used.

Обработка металлов резанием является одним из наиболее распространённых способов получения черновой и чистовой поверхностей. Вибрационные явления, возникающие при этом, оказывают существенное влияние на процесс резания, а также на качество обработанной поверхности, в том числе и на такие параметры как получение необходимых технологических характеристик детали (волнистости, шероховатости), остаточные напряжения, обеспечение наилучшего использования машинного времени и обеспечение максимальной стойкости инструмента.

В данной работе рассмотрены вопросы применения системы Simulink для задачи определения параметров вибрации в процессе точения, а также приведены результаты расчетов влияния ряда геометрических параметров и частотных свойств системы станок - приспособление - инструмент-деталь (СПИД) и некоторых технологических факторов режима резания.

Механизмы возникновения и развития вибраций в процессе точения рассматривались в работах отечественных исследователей [2, 3, 4] и зарубежных [5, 6]. В качестве основных факторов, обуславливающих появление самовозбуждающихся вибраций, рассматривались запаздывание сил резания при изменении толщины среза [2, 4]; наличие координатных связей в упругой системе [2, 3, 5]; прерывистость процесса резания [4]. Для решения задачи определения виброперемещений и усилий в процессе резания использовались различные подходы, требующие, например, разработки оригинального программного обеспечения с использованием языков программирования высокого уровня [4] или использовании аналоговой вычислительной техники [5].

Использование пакета псевдоаналогового моделирования Simulink, входящего в систему компьютерной математики Matlab, как средства для решения данной задачи, было обусловлено следующими причинами. Такими причинами являются: приспособленность Simulink для решения задач в реальном времени; быстрота и простота построения расчетной модели, удобство в изменении исходных данных и представлении результатов расчета; хранение файла модели - .mdl в текстовом виде.

При точении консольной заготовки в качестве доминирующей колебательной системы, то есть системы, совершающей наиболее интенсивные по амплитуде коле-

бания, принимается система детали. Связь парциальных систем инструмента и детали в единой замкнутой упругой системе осуществляется СПИД через зону резания и может быть заменена действием сил резания. Сила резания является нелинейной величиной. Во-первых, она нелинейно зависит от динамической толщины среза $a(t)$. Во-вторых, нелинейность силы резания обуславливается возможной прерывистостью процесса резания, связанной с входом (выходом) инструмента из изделия, а также влиянием формы поверхности, полученной на предыдущем обороте заготовки. В-третьих, процесс резания, как процесс пластической деформации, обладает определенной инерционностью, т.е. изменение силы резания отстает по времени от изменения толщины срезаемого слоя на некоторую величину τ . В качестве модели доминирующей колебательной системы принимаем невесомый стержень с массой на конце, нагруженный инерционными силами, силами упругого и вязкого сопротивления, а также динамическими силами резания.

Уравнения колебаний для данной модели в двух взаимно перпендикулярных плоскостях по принципу Даламбера записываются в виде[4]:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + \eta_{0Z} \frac{dz(t)}{dt} + C_Z z(t) = R_1 \\ m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \eta_{0Y} \frac{dy(t)}{dt} + C_Y y(t) = R_2 \end{cases}, \quad (1)$$

где m – приведенная масса системы; η_{0Y}, η_{0Z} – обобщенные коэффициенты сопротивления по соответствующим осям; C_Y, C_Z – коэффициенты жесткости модели R_1, R_2 – динамические силы резания.

Динамические силы резания определяются по зависимостям [4]:

$$R_1 = \begin{cases} Kb[a_0 + y(t-T-\tau) - y(t-\tau)]^{y_p}, \\ nпу \quad a_0 + y(t-T-\tau) - y(t-\tau) > 0 \\ 0, nпу \quad a_0 + y(t-T-\tau) - y(t-\tau) \leq 0 \end{cases},$$

$$R_2 = \begin{cases} Kb\{A_0[a_0 + y(t-T-\tau) - y(t-\tau)]^{y_p} + B_0\} \\ i \delta \dot{\epsilon} \quad a_0 + y(t-T-\tau) - y(t-\tau) > 0 \\ 0, i \delta \dot{\epsilon} \quad a_0 + y(t-T-\tau) - y(t-\tau) \leq 0 \end{cases}, \quad (2)$$

где K, A_0, B_0, y_p – постоянные, зависящие от геометрии инструмента и свойств обрабатываемого материала; b – ширина среза; a_0 – толщина среза; T – период вращения шпинделя; τ – фазовая характеристика силы резания, то есть время отставания силы резания от изменения толщины среза.

Начальные условия для системы уравнений (1) могут быть приняты в виде:

$$\begin{cases} z(t-\tau) = 0 \quad nпу \quad t-\tau \leq 0 \\ y(t-\tau) = 0 \quad nпу \quad t-\tau \leq 0 \end{cases}, \quad \begin{cases} z(t-T-\tau) = 0 \quad nпу \quad t-T-\tau \leq 0 \\ y(t-T-\tau) = 0 \quad nпу \quad t-T-\tau \leq 0 \end{cases}. \quad (3)$$

Таким образом, процесс возникновения и развития колебаний при точении описывается системой двух связанных нелинейных дифференциальных уравнений.

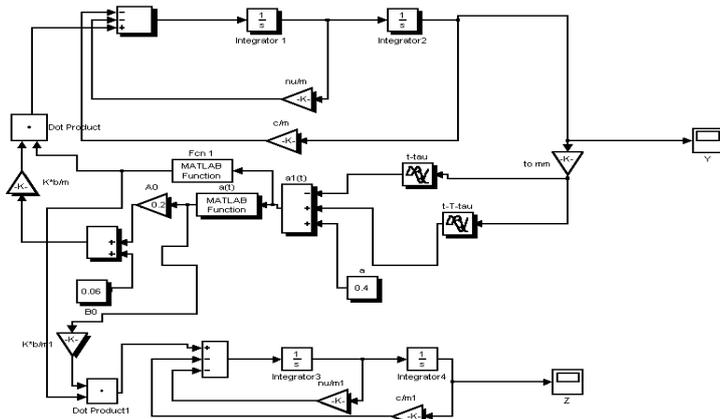
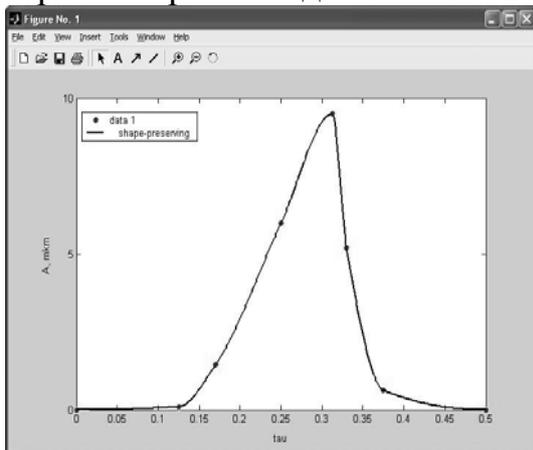


Рис.1. Структурная схема Simulink для расчета процесса точения

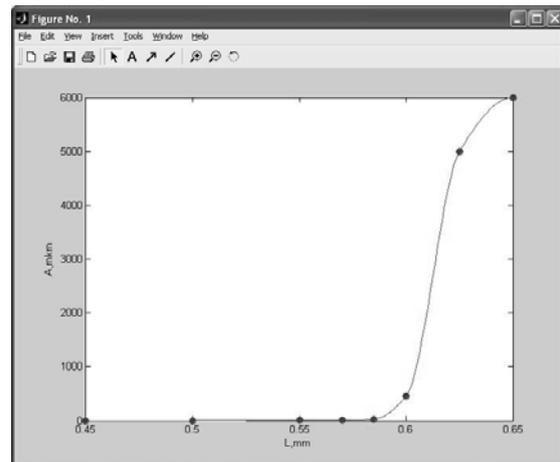
Для решения системы уравнений (1) с начальными условиями (3) была разработана следующая структурная схема (рис. 1). Структурная схема определяет основные функциональные элементы системы, их взаимосвязи и состоит из блоков, являющихся математическими моделями элементов непрерывных систем.

Для тестовой задачи были сформирована система со следующими параметрами: $L=0,5\text{м}$; $D=0,1\text{м}$; $K=2400$; $A_0=0,2$; $B=0,06$;

$b=3\text{мм}$; $a_0=0,4\text{мм}$; $n=10$ оборотов/секунду. График на рис. 2а показывает наличие экстремальной зависимости амплитуды вибраций от фазовой характеристики τ , что подтверждается результатами, полученными в работе [4]. График на рис. 2б является зависимостью амплитуды вибраций от длины заготовки при $\tau=T/4$. Он иллюстрирует, что в диапазоне изменения длины заготовки $\Delta L=0,15\text{м}$ происходит резкое увеличение амплитуды на два порядка. Это позволяет определить пригодность данного режима резания для этой заготовки.



а)



б)

Рис. 2. а - зависимость амплитуды A вибраций от фазовой характеристики силы резания τ ; б - зависимость амплитуды A вибраций от длины L .

В дальнейшем планируется обобщение динамической модели вибраций на случай фрезерования, уточнение метода определения обобщенного коэффициента демпфирования (связанного и с самим материалом, и с величиной зоны резания), обоснование выбора параметра фазовой характеристики силы резания.

Литература: 1. Дэбни Дж. Simulink 4. Секреты мастерства / Дж. Б. Дэбни, Т. Л. Харман; пер. с англ. М.Л. Симонова.- М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. – 403 с.: ил. 2. Кабалдин Ю.Г. Термодинамический подход к анализу причин возникновения вибраций при резании. Вестник Машиностроения 1994, №4, 19-23. 3. Подураев В.Н., Малыгин В.И. Динамическая модель элементов технологической системы с учетом кинематической неустойчивости процесса резания. Вестник Машиностроения 1996, №6, 19-23. 4. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. – Л.:Машиностроение, 1986. – 179с.:ил. 5. Ikawa N., Inami Y. Effect of transient vibration of cutting system on tool wear in interrupted cutting. "CIRP", 1974, 23, №1, 17-18.

КРИТЕРИЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ АДГЕЗИОННОЙ АКТИВНОСТИ ТУГОПЛАВКИХ СОЕДИНЕНИЙ, СОСТАВЛЯЮЩИХ ОСНОВУ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

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

The criterion of high-temperature adhesive activity of the refractory connections, representing temperature of sharp increase in their wettability by liquid metals is offered.

Работоспособность режущих инструментов, как с покрытиями, так и без покрытий, в значительной степени зависит от схватываемости их рабочих поверхностей с обрабатываемым материалом: чем меньше схватываемость, тем выше работоспособность. В основе явления схватываемости лежит адгезионное взаимодействие контактирующих поверхностей инструмента и обрабатываемого материала. Оно может быть слабым, реализующимся за счет сил Ван-дер-Ваальса (энергия такой связи $\sim 0,1$ эВ), или сильным, когда тела прилипают друг к другу, образуя на границе раздела общие межатомные связи (химическая адгезия).

Для процессов металлообработки важна, главным образом, химическая адгезия, закономерности которой следует принимать во внимание при разработке и совершенствовании инструментальных материалов и покрытий для режущих инструментов. Природа адгезии и её закономерности особенно в приложении к тугоплавким соединениям изучены до сих пор плохо, поскольку до недавнего времени адгезии не

уделялось должного внимания.

В настоящей работе на основе большого справочного материала [1,2] проведен анализ смачиваемости наиболее важных в практическом отношении тугоплавких соединений, который позволяет предложить достаточно простой критерий оценки их адгезионной активности при высоких температурах.

При смачивании материала расплавленными жидкими металлами показателем адгезионного взаимодействия является краевой угол смачивания θ , поскольку $A_{адз} = \sigma(1 + \cos\theta)$, где $A_{адз}$ – работа адгезии,

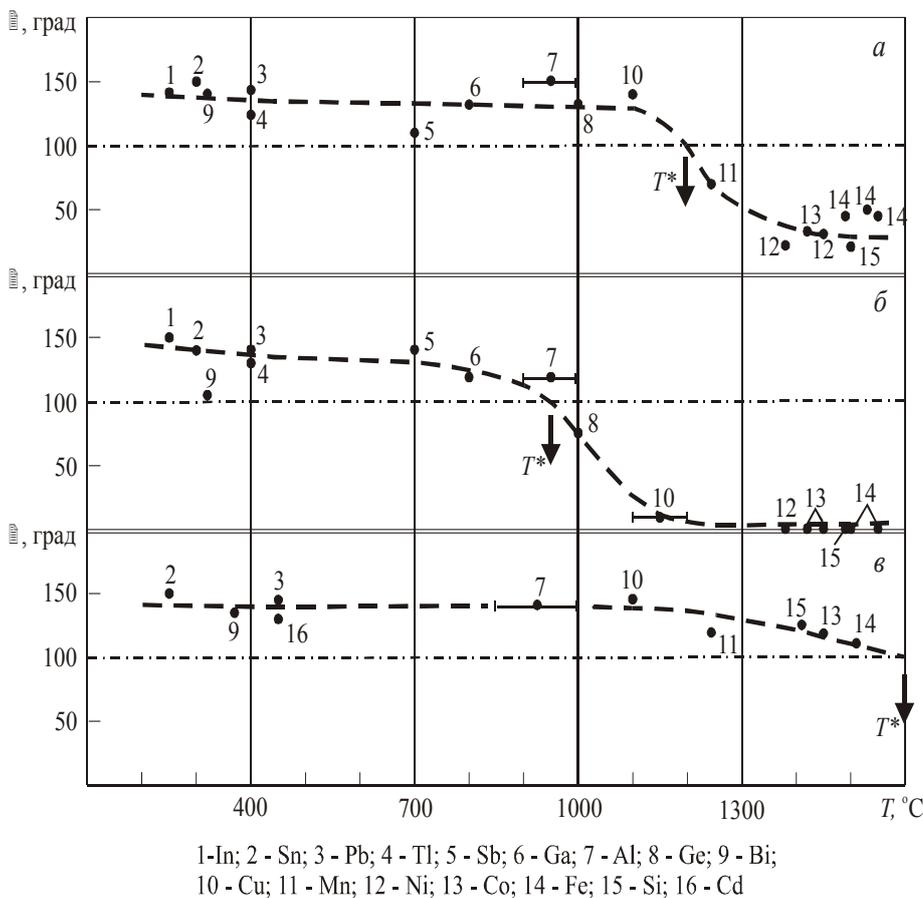


Рисунок. Краевой угол смачивания ZrC (а), Mo₂C (б) и BN (в) жидкими металлами и неметаллами в зависимости от температуры испытаний T .

а σ – поверхностное натяжение жидкости.

На рисунке представлены значения краевого угла смачивания нескольких тугоплавких соединений разными металлами при существенно отличающихся температурах в координатах «угол смачивания – температура испытаний». Видно, что для всех рассматриваемых соединений в широком интервале температур характерно слабое отклонение углов смачивания от некоторого уровня довольно высоких значений θ , свидетельствующих о низкой адгезионной активности соединений в этом интервале температур. Существенное изменение угла смачивания наступает лишь тогда, когда температура превышает определенный предел. Учитывая, что подобные зависимости характерны для широкого перечня тугоплавких соединений, напрашивается вывод о том, что существенное адгезионное взаимодействие соединений с металлами начинается при достижении конкретной, характерной для каждого соединения температуры. Эта температура может служить характеристикой (или критерием) уровня адгезионной (или химической) устойчивости соединения. Предлагается в качестве такой температуры взять температуру T^* , отвечающую уровню угла смачивания $\theta=100$ град. В таблице значения этой температуры приведены для ряда соединений.

Таблица

Значения критерия T^* для разных тугоплавких соединений

Соединение	TiC	ZrC	HfC	VC	NbC	TaC	Cr ₃ C ₂	Mo ₂ C	WC	TiN	ZrN	Al ₂ O ₃	BN	AlN
T^* , °C	1150	1200	1300	1100	1050	1050	1050	950	1000	1450	1500	1650	1600	~1600

Видно, что T^* существенно зависит от химического состава соединения и находится в пределах 950-1650 °C. Наиболее химически устойчивыми являются Al₂O₃, нитрид бора, нитрид алюминия, т.е. соединения на основе *sp*-элементов.

Из таблицы также видно, что нитриды циркония и титана являются наиболее адгезионно-пассивными из соединений на основе *d*-переходных металлов. В карбидах этих металлов можно выделить карбиды металлов IV группы, которые пассивнее, чем карбиды *d*-переходных металлов V и VI групп. Представляется, что эти различия связаны с особенностями электронной структуры соединений.

На наш взгляд, критерий T^* может быть полезен для оценки целесообразности использования конкретных соединений в составе покрытий или инструментальных материалов при таких режимах обработки, когда максимальная контактная температура T_k^{max} достигает весьма высоких значений. Если $T_k^{max} > T^*$ того соединения, которое составляет основу инструментального материала, или покрытия, их использование по параметру адгезионной активности будет малоэффективным. Например, если $T_k^{max}=1300$ °C, из рассмотренных соединений эффективными могут быть лишь: α -BN, AlN, Al₂O₃, ZrN и TiN.

Критерий T^* может быть использован и при разработке новых инструментальных материалов и покрытий. Он может также служить в качестве простой макроскопической характеристики, отражающей особенности электронной структуры соединения.

Литература: 1. Самсонов Г.В. Тугоплавкие соединения / Г.В. Самсонов, И.М. Веницкий – Москва: Металлургия, 1976.–558 с. 2. Физико-химические свойства окислов: Справочник / Под ред. Г.В. Самсонова. –М.: Металлургия, 1969.–455 с.

**АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
КОМБИНИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА**

Карпуть В.Е., докт. техн. наук, проф., **Граница В.А.**, заместитель директора ХНПК «ФЭД», (г. Харьков, Украина)

The analysis of effective application of the combined tools while forming prismatic details on multiuniversal NC-machines is given.

Конструкция комбинированного инструмента зависит от формы и размеров отверстия требуемой точности и параметров шероховатости обработанной поверхности и величины припуска на обработку.

Комбинированный инструмент значительно дороже, чем стандартный, поэтому его применение предпочтительно в условиях крупносерийного и серийного производства для обработки деталей из цветных металлов и сплавов. Производственный опыт, накопленный на Харьковском машиностроительном заводе «ФЭД», подтверждает эффективность применения комбинированного инструмента и в мелкосерийном производстве агрегатов, в первую очередь корпусных деталей из цветных сплавов.

Наибольшую долю в общем количестве комбинированных инструментов составляют зенкеры: перовые (64%) и многолезвийные (26%). Ступенчатые сверла составляют 4%, развертки – 4,7%, сверла-развертки – 2,3%.

В геометрические параметры режущей части комбинированного инструмента внесены некоторые изменения, учитывающие особенности обработки.

Наиболее распространенным на предприятии методом обработки является сверление быстрорежущими сверлами, режущая часть которых затачивается под двойным углом при вершине: проводится подточка пера на передней поверхности и сердцевины сверла у поперечной кромки. Уменьшение угла конуса до 90° улучшает процесс сверления сквозных отверстий, но при этом значительно уменьшает прочность вершины. Для увеличения прочности вершины сверла ее заточка выполняется под углом 140° на длине 2,0-2,5 мм по главной режущей кромке, а остальная часть конуса сверла имеет угол 90° . Такое сочетание углов при вершине и их линейное соотношение по длине главной режущей кромки улучшает процесс сверления. Угол конуса 140° увеличивает прочность вершины сверла, а угол 90° облегчает работу сверла и не образует заусенцев при сверлении сквозных отверстий. Передний угол $\gamma = 10^\circ$, задний угол $\alpha = 10...11^\circ$, угол наклона винтовой канавки $\omega = 20...38^\circ$.

Геометрические параметры режущей части комбинированных зенкеров: угол наклона винтовой канавки $\omega = 20...38^\circ$, угол заборного конуса $\varphi = 60...120^\circ$, передний угол $\gamma = 5...8^\circ$, задний угол $\alpha = 8...20^\circ$; разверток: главный угол в плане $\varphi = 90^\circ$, передний угол $\gamma = 10^\circ$, задний угол $\alpha = 5...12^\circ$, угол наклона винтовой канавки $\omega = 0^\circ$.

Нами выполнен статистический анализ конструктивных характеристик комбинированных инструментов: минимального диаметра обработки, количества ступеней инструмента, соотношения длин ступеней, соотношения диаметров ступеней, а также материала режущей части. Результаты анализа представлены в виде диаграмм на рис. 1...5.

Полученные результаты позволяют оценить тенденции развития комбинированного инструмента и сформулировать исходные данные для решения задачи оптимизации условий его применения.

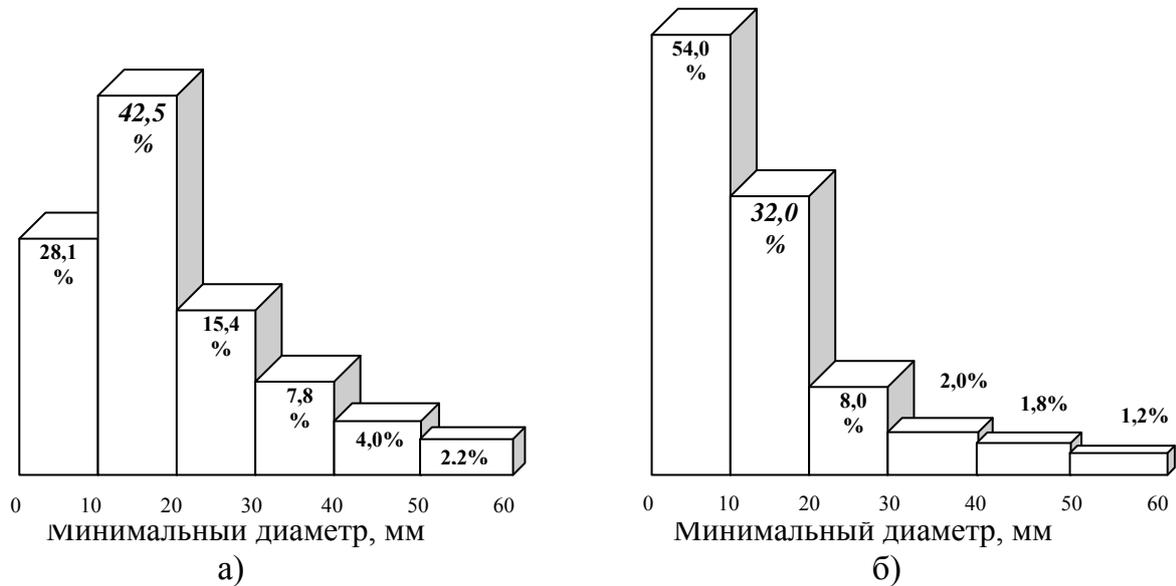


Рис. 1. Диаграммы распределения минимальных диаметров обработки перьевых (а) и многолезвийных (б) зенкеров.

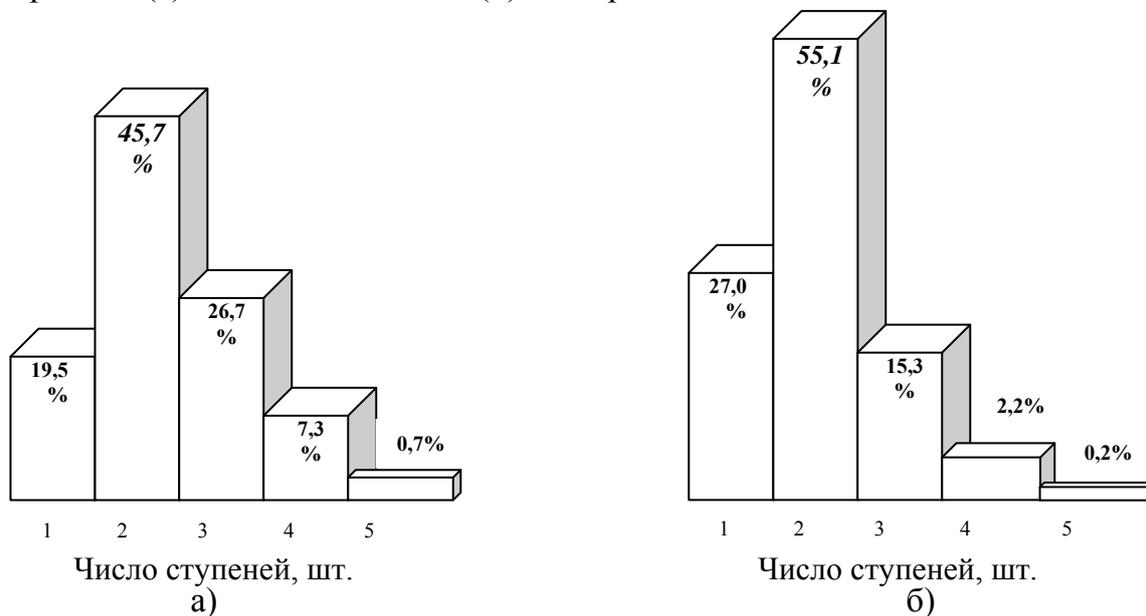


Рис. 2. Диаграммы распределения по числу ступеней перовых (а) и многолезвийных (б) зенкеров.

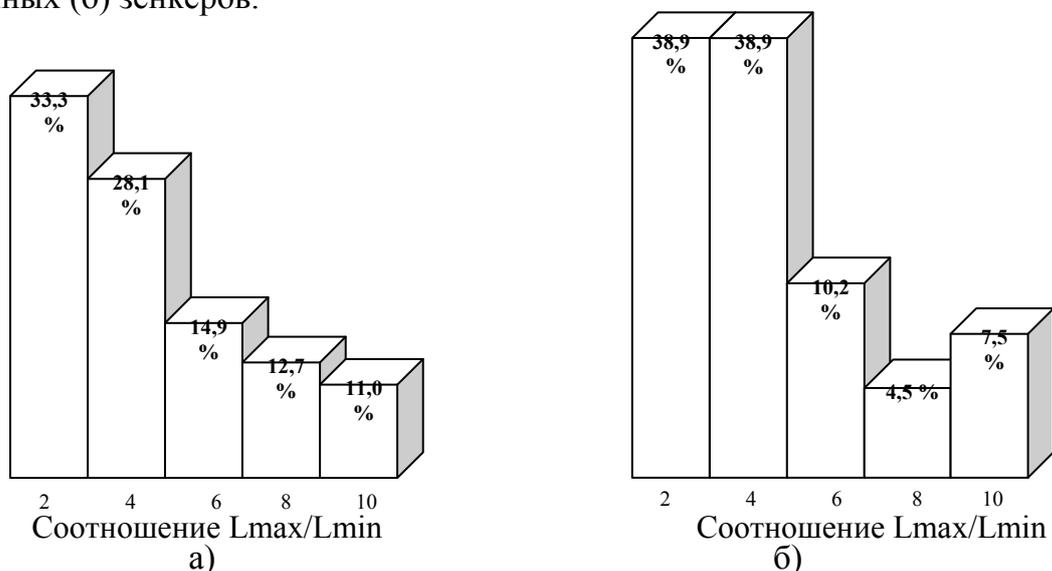
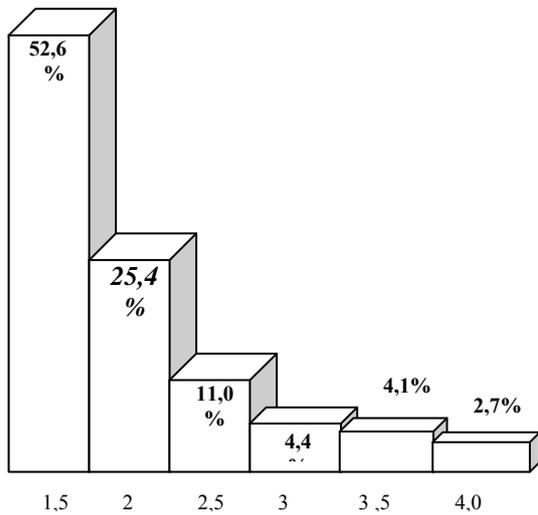
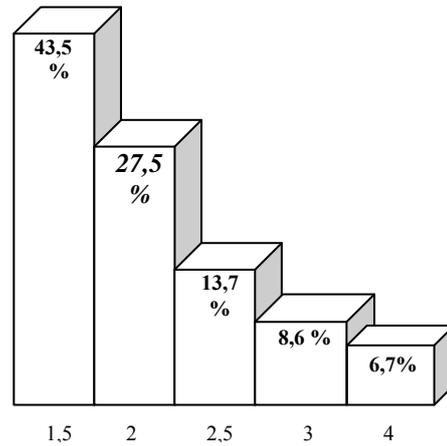


Рис. 3. Диаграммы распределения по соотношению максимальных L_{max} и минимальных L_{min} длин ступеней перовых (а) и многолезвийных (б) зенкеров.

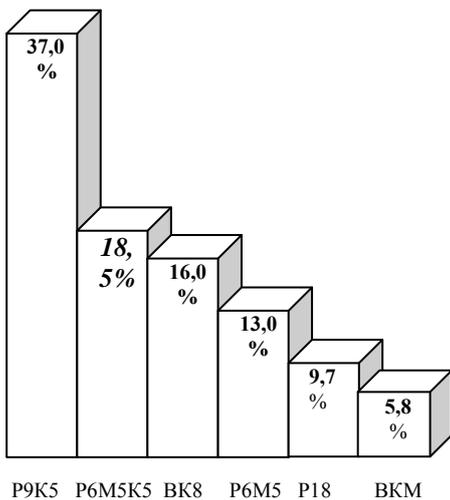


Соотношение d_{max}/d_{min}
а)

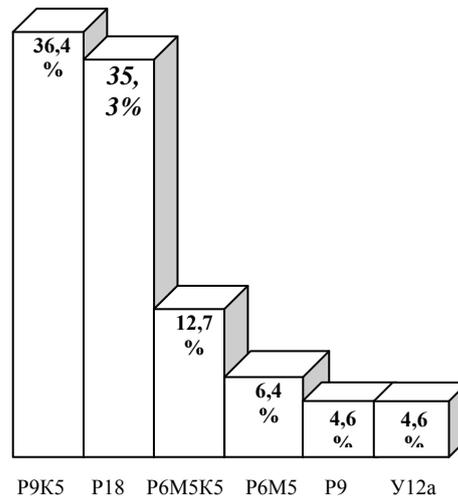


Соотношение диаметров d_{max}/d_{min}
б)

Рис. 4. Диаграммы распределения по соотношению максимального d_{max} и минимального d_{min} диаметров перовых (а) и многолезвийных (б) зенкеров.

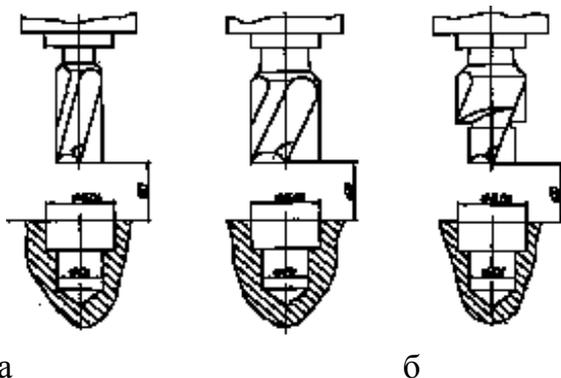


Материал инструмента
а)



Материал инструмента
б)

Рис. 5. Диаграммы распределения по материалу режущей части перовых (а) и многолезвийных (б) зенкеров.



а

б

Рис. 6. Технологические схемы обработки ступенчатого отверстия стандартными инструментами (а) и ступенчатым зенкером (б).

Нами выполнены также экспериментальные исследования точности обработки комбинированным зенкером ступенчатого отверстия (рис.6).

Результаты контрольных измерений, приведенные в таблице, подтверждают высокие точностные возможности обработки комбинированными зенкерами как стальных, так и алюминиевых деталей.

Показатели точности зенкерования ступенчатого отверстия $\varnothing 10,1/15,6$ мм

Контролируемый параметр	Диаметр ступени, мм	Материал заготовки			
		Сталь		Алюминий	
		Тип инструмента			
		Комбинированный	Стандартный	Комбинированный	Стандартный
Средний диаметр, мм	10,1	10,144	10,212	10,128	10,384
	15,6	15,092	15,325	15,081	15,305
Отклонение от окружности, мм	10,1	0,003	0,003	0,001	0,007
	15,6	0,002	0,006	0,003	0,001
Погрешность позиционирования		0,007	0,021	0,004	0,019

Таким образом, анализ производственного опыта применения комбинированного инструмента подтверждает его эффективность.

УДК 621.91**ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАТКА ДЛЯ ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ**

Буденный М. М., канд. техн. наук, **Мовшович А. Я.**, докт. техн. наук
(г. Харьков, Украина)

In clause main principles of equipment of multioperational machine tools and are stated to readjusted industrial equipment.

Одним из составных элементов определяющих точность, и производительность обработки, надежность и эффективность гибких производственных систем (ГПС) является технологическая оснастка.

Для обеспечения эффективной работы ГПС при создании средств технологического оснащения должны учитываться ряд общих и специфичных требований.

Прежде всего они должны быть обратимыми, многократного применения. Только в этом случае оснастка будет соответствовать маневренности всей станочной системы. Не может быть гибкой станочная система, если оснастка будет разового применения и при переходе на новое изделие ее необходимо проектировать и изготавливать заново. На ГПС в меньшей степени целесообразно изготавливать постоянную номенклатуру деталей. Но если все же для дозагрузки в течение определенного времени будут обрабатывать постоянную номенклатуру, особенно на стадии первичного внедрения, то это не означает, что на последующих этапах производства она не будет расширяться за счет часто меняющихся опытных, мелких и средних партий. Новая техника должна постоянно совершенствоваться конструктивно и обрабатываться на технологичность. Стремление добиваться большей точности за счет максимальной концентрации операций, обработки деталей с одной или малого числа установок, повышать эффективность использования дорогостоящего гибкого оборудо-

дования приведут к тому, что объемы изготовления деталей разной партионности будут расширяться. В этих условиях наращивать парк специальной необратимой оснастки значит снижать эффективность гибкой станочной системы, создать трудности на пути ее внедрения, так как будут необходимы дополнительные мощности, средства и время для изготовления спецоснастки, ее ремонта, площади для хранения. Поэтому выход в том, чтобы из разработанных стандартных или унифицированных элементов, изготавливаемых централизованно, создавать приспособления многократного применения, но разной длительности эксплуатации без разборки или переналадки, т.е. до полной обработки каждой партии деталей. В зависимости от частоты повторяемости изделия или размера партии обрабатываемых деталей обратимые приспособления должны различаться тем, что одни часто, другие редко собираются или переналаживаются. Диапазон технически и экономически оправданного применения гибких производственных систем при хорошо налаженном порядке внедрения может быть весьма широк: от мелкосерийного до крупносерийного и даже массового частоменяющегося производства.

В условиях мелкосерийного производства и частой смены изделий при отсутствии сходных групп деталей, целесообразно променять оснастку типа универсально-сборной, с помощью которой можно собирать приспособления любого назначения из заранее централизованно изготовленных стандартных элементов. В качестве базовых оснований таких приспособлений можно применять плиты и угольники разных типоразмеров с унифицированными рядами крепежных и точных фиксирующих отверстий с шагами 40, 60, 80 мм в зависимости от размеров плит и уголников, и типоразмеров станков, что обеспечивает широкий диапазон возможностей базирования и универсальность крепления обрабатываемых деталей.

Метод крепления деталей в приспособлениях этого типа должен быть предусмотрен в двух вариантах: с ручным (винтовым, эксцентриковым) зажимом (при небольшом количестве деталей и малом числе зажимов – $1 \div 2$); с гидравлическим зажимом (при больших зажимных усилиях, точности обработки и количестве точек зажима).

Конструкция гидрозажимов должна быть герметичной и обеспечивать стабильность зажимного усилия. Для обеспечения большей компактности цилиндров и компоновок в целом необходимо применить приводы с давлением 200 атм.

В условиях серийного многономенклатурного группового производства, когда базовое основание приспособления можно постоянно или на 50-60% загрузить деталями одной или нескольких родственных групп деталей целесообразно применять широкоуниверсальные специализированные на несколько сходных групп деталей переналаживаемые гидрофицированные базовые основания приспособлений с наладочными элементами типа УПТО. В условиях постоянной номенклатуры и большей серийности можно применять специальные наладки. При более частой сменяемости изделий и меньших партиях целесообразнее применять наладки путем подбора из имеющихся стандартизированных по отрасли или унифицированных на заводе элементов УСПО. Предпосылкой эффективной загрузки этой оснастки является ее широкая универсальность, возможность использования механизированных оснований для базирования и крепления нескольких родственных групп деталей. В перспективе должна быть предусмотрена возможность автоматической смены или регулировки наладок и крепления обрабатываемых деталей на загрузочной позиции гибкой про-

изводственной системы.

В условиях крупносерийного и массового производства, когда обеспечивается длительная загрузка приспособлений одними и теми же обрабатываемыми деталями, целесообразно применять компоновку из типовых конструкций неразборных или сборных оснований и наборов стандартизованных элементов, в т.ч. и средств механизации, обратимые специальные приспособления длительного использования. Приспособление должно быть сборно-разборным и заново собираться только перед переходом на обработку нового изделия.

Главным преимуществом такой оснастки является возможность ее перекомпоновки и высокая маневренность при постановке на серийное производство принципиально новых изделий, минимальные затраты и сжатые сроки подготовки их производства. Так как в этом случае количество сборок-разборок значительно уменьшается и с целью сокращения затрат на изготовление, можно без больших издержек для дела, понизить универсальность и, следовательно, себестоимость базовых оснований приспособлений путем выполнения ограниченного числа крепежных и установочных отверстий. При повторном использовании базового основания можно выполнить на нем дополнительные крепежные установочные отверстия применительно к требованиям новой детали.

Корпуса базовых оснований таких приспособлений могут иметь три исполнения: 1) неразборная конструкция в сварном исполнении, из заранее выполненных и централизованно поставленных унифицированных заготовок; 2) собираемые из отдельных унифицированных элементов на конических штифтах сборно-разборного типа, что обеспечит и сборность, и жесткость конструкции; 3) базовые основания, выполненные по чертежам УСПО, но с меньшим количеством крепежных и установочных отверстий, в соответствии с требованиями конкретной компоновки. Все остальные элементы, необходимые для сборки таких приспособлений (цилиндры, зажимные, крепежные, установочные и др. детали и сборочные единицы) должны быть стандартизированы и заказываться на специализированных заводах.

Учитывая, что для многооперационных станков характерен большой перепад режимов резания и с целью создания большей жесткости и стабильности получаемых размеров, фиксирующие элементы приспособления, обеспечивающие соединение опор, призм, сборочных единиц на базовой плите и между собой должны выполняться беззазорного типа (в отличие от соединения паз-шпонка и цилиндрический штырь-отверстие), а для обеспечения требований сборности-разборности – это соединение должно быть сборным (в отличие от конических штырей, применяемых в неразборных специальных приспособлениях).

С целью обеспечения гидрофикации закрепления деталей в приспособлениях, устанавливаемых на вращающихся или перемещающихся столах многооперационных станков или столах-спутниках гибких производственных систем необходимо применить такую гидросхему, которая не требует постоянного подсоединения к источнику давления. Для этой цели могут быть применены пружинно-гидравлические цилиндры, которые посредством быстро-разъемных соединений подключаются к источнику давления, после чего отсоединяются и в течение длительного времени (во время обработки детали или хранения приспособления в складе и накопителе спутников) поддерживают необходимое давление.

По этой схеме для зажима деталей применяют обычные гидроцилиндры, а для компенсации утечек – пружинно-гидравлические компенсаторы утечек. Для обеспе-

чения большей надежности таких гидросхем необходима предварительная очистка рабочей жидкости. Повысить надежность таких гидроустройств можно за счет применения гидросхемы полностью закрытого типа, в которых жидкость приспособления не смешивается с жидкостью внешнего источника давления и полностью герметизирована в гидросистеме приспособления. В качестве источника энергии таких устройств можно применять электромеханические, гидромеханические ключи или встроенные гидроцилиндры.

По этой схеме представляется надежнее всего решить проблему автоматизации закрепления деталей в приспособлении на загрузочной позиции ГПС с помощью робота.

Можно рекомендовать метод оснащения гибких производственных систем. Первый – путем установки приспособлений на спутниках, подаваемых в зону обработки с помощью накопителя и устройства для смены спутников. Поскольку установка всех необходимых элементов приспособлений и крепление самой обрабатываемой детали будет происходить на базовом его основании, то можно на верхней поверхности спутника выполнить только несколько установочных и крепежных отверстий, на которых будет крепиться базовое основание приспособления, что позволит упростить конструкцию и сократить затраты на изготовление спутника. Можно этой же цели добиться и путем создания спутников из сборных элементов: базовой плиты и двух захватов, с помощью которых спутник ходит по направляющим транспортных устройств и крепится в рабочем положении на станке.

Второй путь – это создание и установка на столы многооперационных станков автоматизированных гидравлических приспособлений, заготовки в которые будут подаваться и готовые детали убираться с помощью портального робота, обслуживающего группу станков ГПС.

Автоматизированное приспособление должно принять от робота деталь, обеспечить правильность ее установки и базирования, постоянство зажима на весь период обработки, возможность отбрасывания (или сдува) стружки и беспрепятственного удаления детали из приспособления. Преимущество этого варианта в том, что сокращается количество необходимых спутников. Трудности могут возникнуть в связи с появлением дополнительных элементов ненадежности, которые для их устранения требуют исследования конструкций (накопление стружки от всех деталей, наличие робота необходимой точности и уровня надежности и другие).

Преимущество первого варианта в том, что он позволяет вести последовательную обработку нескольких деталей или нескольких поверхностей одной детали по одной программе и для этого требуется меньшее количество приспособлений одного наименования.

Все детали и сборочные единицы, а также элементы корпусов приспособлений, которые будут применяться в любых условиях и серийности производства, должны быть унифицированы, представлять собой единые типоразмерные ряды. Они должны иметь повышенную долговечность и надежность. В связи с этим основные элементы УСПО должны быть выполнены из сталей или чугунов, которые имеют поверхностную твердость $HR_{\text{с}}$ 50-62. Приспособления должны быть снабжены датчиками для определения правильности базирования обрабатываемых деталей. Станки должны быть оборудованы универсальными установками для смыва стружки из зоны резания и ее транспортирования за пределы станка.

**РАСШИРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ
УНИВЕРСАЛЬНО-СБОРНЫХ ПРИСПОБЛЕНИЙ**

Буденный М.М., канд. техн. наук, (г. Харьков, Украина)

In clause ways of increase of rigidity and technological opportunities of system USP are considered.

Принято считать, что оптимальная область применения универсально-сборных приспособлений – единичное и мелкосерийное производство. УСП находят широкое применение в ремонтных, экспериментальных и опытных производствах, в механических цехах с частой сменой объектов производства и малой серийностью. Именно в этих условиях наиболее полно проявлялись такие преимущества УСП, как универсальность, обратимость технологическая маневренность и гибкость.

Но современная тенденция развития технологии машиностроения требует расширения преимуществ, которые создает гибкость на серийное и даже массовое производство. Гибкому оборудованию должна соответствовать гибкая технология, а следовательно, и оснастка.

Возможность частой и быстрой смены изделий предопределяет прежде всего техническая характеристика оснастки, значение которой в общем объеме затрат и сроках подготовки производства при смене изделий составляет по многим источникам до 70-80%. Все это вызывает необходимость находить средства более полного использования указанных преимуществ УСП и одновременно преодолевать недостатки, свойственные этой системе оснащения, которые не позволяли ее эффективно использовать в условиях повышенной партионности, точности и режимов обработки, когда требования к жесткости, виброустойчивости и стабильности получаемых размеров являются определяющими. В этой связи целесообразно использовать преимущества гибкости и универсальности УСП в период становления крупносерийного и даже массового производства, когда еще не изготовлена специальная оснастка в силу отсутствия мощностей и необходимости выйти из положения на период разработки и изготовления капитальной специальной или стандартизованной переналаживаемой технологической оснастки. Если изделие запускается крупной партией на короткий период и в последствии будет запускаться более совершенное новое изделие, то отпадает необходимость в разработке специальной оснастки. Такие изделия целесообразно выполнять, применяя имеющуюся на заводе стандартную переналаживаемую и универсально-сборную оснастку.

Для приспособлений, в которых будут обрабатываться детали с повышенными точностными характеристиками, на высоких режимах резания или большими партиями, необходимые более устойчивые жесткостные характеристики.

Проведенные исследования показали, что количество стыков и контактные деформации мало влияют на общую жесткость компоновок УСП.

Большое влияние на жесткость компоновки УСП и стабильность обработки оказывают собственные деформации плит, опор и др. основных деталей УСП, наличие зазорного шпоночного соединения, диаметры крепежных элементов.

К способам повышения жесткости компоновок УСП и обеспечения заданной стабильности получаемых размеров обработки относятся: применение оптимальных монтажных схем приспособлений конструктивное усовершенствование установочных, соединительных и др. элементов УСП.

Если к перечисленным преимуществам УСП, имеющих к тому же повышенную

долговечность (поверхностная твердость HR 62-64), присовокупить достоинства неразборных специальных приспособлений, которые обладают более высокой жесткостью, то технические характеристики УСП можно привести в соответствие с требованиями повышенных режимов резания и других требований и условий, свойственных серийному производству.

С целью устранения нестабильности компоновок, вызываемых зазорным шпоночным соединением, можно рекомендовать применение шпонок с небольшим натягом, а еще лучше эксплуатацию регулируемых шпонок, обеспечивающих выборку зазоров с учетом имеющегося износа и обеспечения жесткости соединения на уровне беззазорного.

До 60% жесткости компоновки УСП определяется жесткостью базового основания. Жесткость базовых оснований компоновок УСП можно значительно, в десятки раз повысить путем увеличения числа креплений по краям, но в особенности в средней части плиты. Для этого в больших плитах, где нет отверстий в средней части, можно расточить отверстия. Для повышения жесткости сборных плит нужно обеспечить их стыковку с помощью большего числа шпонок и крепление не только между собой, но и путем применения соединительных планок (накладок) как по бокам, так и сверху. Соединительные планки имеются в комплекте УСП, но можно дополнительно изготовить планки большего сечения.

Повышению жесткости будет служить применение базовых оснований большей серии (16), а опорных деталей серии 12. Для этого необходимо наличие переходных элементов (шпонок, шпилек), которые централизованно не поставляются и должны быть изготовлены силами каждого завода.

Для применения крепежа больших размеров (M16, 18 или 22 мм) в компоновках серии 12 можно применять переходные накладки, у которых выполнены крепежные отверстия M12 и M16 или др. размеров.

Такие крепежные накладки можно применять и на больших базовых основаниях, выполняемых без пазов, которые можно специально изготовить для сборки компоновок больших размеров, чем имеющиеся в комплекте УСП плиты. Плиты такой конструкции нужно выполнять как специальные элементы приспособлений, но могут применяться и многократно с доделкой или переналадкой. Такие плиты можно изготавливать и применять (в случае необходимости) повышенной жесткости и в условиях стабильного серийного производства, когда применение более дорогих, но менее жестких плит УСП экономически и технически не оправдано.

Жесткость компоновок можно повышать и за счет оптимального выбора, установки и крепления разных типоразмеров опор на поверхности базовой плиты. В противовес усилиям резания при креплении деталей в приспособлении должны применяться опоры повышенного поперечного сечения, по две опоры или по опоре и угольнику. Это позволяет крепить стойку к плите двумя болтами. В ряде случаев, когда требуется особенно высокая жесткость можно применять опоры или угольники в специальном исполнении (без пазов) повышенной и крепить их болтами большего диаметра.

С целью повышения долговечности элементов УСП, учитывая, что из них будут собираться компоновки длительного применения без разборки, промывки и чистки, необходимо все элементы, предназначенные для этих целей, покрыть антикоррозионным покрытием.

В настоящее время разработаны средства гидрофикации, которые позволяют

механизировать компоновки УСП. Однако эффективность гидрофикации компоновок УСП при малой партионности не велика. Она наиболее целесообразна в условиях повышенной серийности производства, когда затраты на сборку более сложных (механизированных) приспособлений оправдываются длительностью нахождения их в работе. Чтобы повысить уровень гидрофикации приспособлений необходимо решить проблему повышения жесткости и стабильности размеров и обеспечить возможность эффективного применения компоновок УСП в условиях повышенной серийности производства взамен специальной необратимой оснастки.

На первый взгляд применение УСП в условиях повышенной серийности производства может показаться не эффективным. Однако глубокий анализ современных тенденций развития технологии машиностроения показывает, что приоритет в выборе средств оснащения нужно дать потребности гибко перестраиваться на выпуск более эффективных и нужных изделий, а все другие соображения и обстоятельства уступают этому решающему требованию.

При этом необходимо учитывать требование обеспечения качества их обработки, а также окупаемости затрат на приобретение комплектов УСП.

Чтобы дать ответ на вопрос об эффективности сборки компоновок УСП для их применения в условиях серийного производства, необходимо учесть следующие обстоятельства. Срок службы элементов УСП 25-30 лет, а процент амортизации экономисты определили в 10%, т.е. основные детали УСП списывают после 10 лет эксплуатации. Этот процент определен исходя из того, что такие определяющие точность элементы УСП как размеры паза и точность ответстия через 10 лет изнашиваются и не удовлетворяют требования сборки точных компоновок. Из этих деталей собирают приспособления для обработки менее точных деталей. Но из них можно путем применения безззорных соединений и определенной методики сборки компоновать высокоточные специальные обратимые механизированные приспособления длительной эксплуатации, которые позволяют гибко и быстро оснащать не только единичное и мелкосерийное, но и серийное производство, в период его становления высвобождать мощности инструментальных цехов для изготовления другой продукции, быстрее осваивать новую технику. При этом нельзя не учитывать, что на большинстве заводов за многие годы скопился громадный парк УСП, который по разным техническим и организационным причинам используется только на 20-30%.

Количество применяемых сборок УСП очень нужных производству для повышения уровня оснащенности, замены необратимых специальных приспособлений и роста производительности труда можно увеличить в 2-3 раза. При этом необходимо будет в среднем пополнить заводские комплекты путем их профилирования с учетом специфики каждого предприятия не более, чем на 5-8%.

Необходимо обеспечивать создание и поддержание в работоспособном состоянии разветвленной сети подачи воздуха, ремонт гидростанций и приводов для гидроприспособлений и если это необходимо для расширения технологических возможностей оборудования, осуществление проектов его модернизации, в соответствии с возникающими задачами по гибкой перестройке производства.

Выполнение указанных мероприятий позволит повысить уровень применения переналаживаемой оснастки на 20-25% путем более полного и эффективного использования имеющегося парка УСП.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ШЛИФОВАНИИ КОМПОЗИЦИОННЫМИ КРУГАМИ

Худобин Л.В., докт. техн. наук, **Веткасов Н.И.**, докт. техн. наук
(г. Ульяновск, Россия)

The composite circles are the new instrument for effective grinding of preforms from different materials. One of conditions of boosting of productivity of operations of grinding by composite circles is the transportation to a workpiece range of optimum quantity of rigid lubricant, which consumption depends on number and dimensions of structural members for his arrangement in a circle.

Применение композиционных шлифовальных кругов (КШК) взамен стандартных позволяет уменьшить теплонапряженность процесса шлифования как благодаря прерывистости их рабочих поверхностей, так и за счет интенсификации смазочного действия смазочно-охлаждающих технологических средств. Последнее при шлифовании КШК определяется составом твердого смазочного материала (ТСМ), числом и размером конструктивных элементов для его размещения. Поэтому определенный научный и практический интерес для проектирования и применения КШК представляют исследования, направленные на доказательство наличия смазочного материала непосредственно в зоне контакта КШК и заготовки и установление зависимости его расхода от числа и геометрических размеров пазов и прорезей, в которых размещается ТСМ.

Для решения этой задачи разработан оригинальный способ определения расхода ТСМ при шлифовании КШК: расход ТСМ определяется относительным методом на операции плоского шлифования специально подготовленным прерывистым шлифовальным кругом с радиальными пазами. Эти пазы на одном из торцов круга плоского профиля перед проведением исследований полностью заполняют исследуемым смазочным материалом (рис. 1). Пазы, расположенные на другом торце, заполняют ТСМ частично: кромка смазочных элементов (СЭ) в этих пазах должна располагаться на расстоянии (5 – 10) мм от периферийной поверхности круга (по радиусу). Таким образом, одна половина шлифовального круга при таком заполнении его радиальных пазов работает как прерывистый шлифовальный круг (ПШК), вторая – как КШК. Шлифуют образцы с двумя рядами отверстий диаметром 3 мм (рис. 2). Перед шлифованием в отверстия помещают цилиндрические вкладыши из фильтровальной бумаги. Выбор диаметра отверстия 3 мм в образце обусловлен тем, что при меньшем диаметре используемые средства измерения не позволяют регистрировать очень малые изменения массы вкладышей, а при диаметре отверстия свыше 3 мм имеет место недопустимо большая погрешность измерения из-за действия различных случайных факторов.

В процессе шлифования этого образца специально подготовленным шлифовальным кругом (см. рис. 1) часть смазочного материала, находящегося в пазах КШК на уровне его рабочей поверхности, под действием теплоты, выделяющейся в зоне шлифования, переходит из твердого агрегатного состояния в жидкое и пропитывает вкладыши, размещенные в отверстиях образца (зона КШК на рис. 2). При этом вкладыши, размещенные в зоне ПШК, не пропитываются смазочным материалом (зона ПШК).

Для оценки расхода ТСМ вкладыши взвешивают до шлифования и сортируют таким образом, чтобы отклонения их массы не превышали 0,2 мг. Затем вкладыши устанавливают в отверстия шлифуемого образца, а после шлифования аккуратно из-

влекают из отверстий и вновь взвешивают. В результате получают две группы вкладышей: одна из зоны шлифования ПШК с массами m_1, m_2, \dots, m_k , вторая из зоны шлифования КШК с массами $m_{k+1}, m_{k+2}, \dots, m_n$. Вычисляют массу ТСМ, пропитавшего вкладыш или налипшего на него, по зависимости

$$\bar{m}_c = 2 \cdot \frac{\sum_{i=k+1}^n m_i - \sum_{i=1}^k m_i}{n - k}.$$

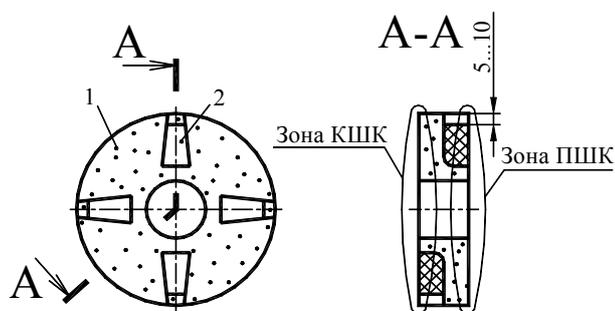


Рис. 1. Специальный шлифовальный круг.

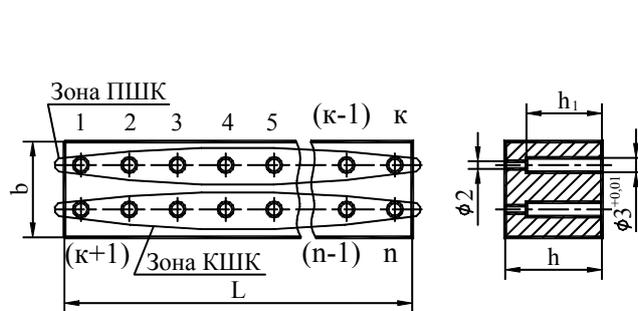


Рис. 2. Образец для определения расхода ТСМ.

Затем определяют удельный расход смазочного материала Q'_c , $\text{мг} \cdot \text{мм}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$, и расход смазочного материала в зоне контакта КШК и заготовки Q_c , $\text{мг} \cdot \text{мин}^{-1}$, по зависимостям:

$$Q'_c = \frac{4 \cdot \bar{m}_c}{\pi \cdot d_0^2 \cdot \tau_{ш}}; \quad Q_c = Q'_c \cdot l_k \cdot b,$$

где d_0 – диаметр отверстия в образце, мм; l_k – длина дуги контакта круга и заготовки, мм. При плоском шлифовании периферией круга $l_k = \sqrt{D_k \cdot t}$, где D_k – наружный диаметр круга, мм; t – глубина шлифования, мм); b – ширина шлифуемой поверхности заготовки, мм.

По изложенной выше методике определили, например, расход смазочного материала при плоском шлифовании без применения СОЖ образцов из сталей 30ХГСА, HRC 45...50, P6M5, HRC 63...65 и 12X18H10T, HB 265...280 (рис. 3) кругом 1–250×25×76 24A40HСМ16Б1. Варьировали числом радиальных пазов на каждом торце круга (4; 8; 12) и врезной подачей шлифовального круга S_b (0,005 и 0,01 мм/дв.х). Окружная скорость круга $V_k = 35$ м/с, скорость стола $V_{cm} = 15$ м/мин. В качестве ТСМ использовали состав, содержащий 60 % (по массе) графита ГЛ–1 и 40 % технического воска.

Оценивали влияние параметра ν КШК (отношение длин СЭ и режущего выступа на рабочей поверхности круга) на средний расход ТСМ в зоне контакта круга и заготовки, увязав его со средним количеством режущих абразивных зерен на рабочей поверхности круга, шероховатостью шлифованной поверхности детали (R_a) и средней контактной температурой T_k .

Предварительно определили количество режущих абразивных зерен $z_{аз}$ на рабочей поверхности КШК:

$$z_{аз} = n_0 \cdot S_{кр},$$

где n_0 – количество режущих абразивных зерен на единичной площадке рабочей

поверхности круга, мм^{-2} . $n_0 = 5,41 \text{ мм}^{-2}$ для круга 24A40НСМ17Б1; $S_{кр}$ – площадь рабочей поверхности круга, мм^2 :

$$S_{кр} = 2(\pi R_k \cdot H_k - z_n \cdot t'_n),$$

где H_k – высота шлифовального круга, мм; z_n – число радиальных пазов на одном торце круга; t'_n – ширина радиального паза на рабочей поверхности круга, мм.

Установлено, что увеличение ν от 0 до 0,24 приводит к уменьшению $z_{аз}$ в 1,2 раза. Средний расход ТСМ в зоне контакта КШК и заготовки Q_c при этом увеличился в 2,7 раза, среднее арифметическое отклонение профиля шлифованной поверхности R_a – в 1,3 раза, средняя контактная температура T_k уменьшилась в 1,4 раза. Очевидно, снижение T_k с увеличением ν связано как с увеличением длительности перерывов в процессе шлифования в связи с прерывистостью рабочей поверхности КШК, так и с ростом расхода ТСМ. На увеличение параметра R_a шлифованной поверхности при увеличении ν доминирующее влияние оказывает уменьшение количества режущих абразивных зерен $z_{аз}$ (а не расход ТСМ Q_c).

Таким образом, по результатам исследований расхода ТСМ при шлифовании композиционными кругами без применения СОЖ можно заключить следующее: разработанные способ и методика позволяют адекватно оценивать расход ТСМ через зону шлифования; доказано, что ТСМ присутствует непосредственно в зоне контакта КШК и заготовки; расход ТСМ зависит от числа и размеров конструктивных элементов для его размещения в КШК; доминирующее влияние на шероховатость шлифованной поверхности заготовки оказывает не увеличение расхода ТСМ, а уменьшение количества режущих зерен на рабочей поверхности КШК при увеличении параметра ν ; увеличение расхода ТСМ оказывает положительное влияние на величину средней контактной температуры T_k .

УДК 621.923

КОМПОЗИЦИОННЫЕ КРУГИ ДЛЯ ТОРЦОВОГО ШЛИФОВАНИЯ

Михайлин С.М., канд. техн. наук, **Худобин Л.В.**, докт. техн. наук,
Веткасов Н.И., докт. техн. наук (г. Ульяновск, Россия)

In the article the constructions of composite wheels for planar end grinding are submitted (shown), and also the results of experimental researches of their service capability are adduced.

Широкое применение при обработке плоских поверхностей заготовок типа колец подшипников, дисков, зубчатых колес, корпусных и других деталей и заточке режущего инструмента получил такой высокопроизводительный способ обработки, как плоское шлифование торцом круга. Однако повышение эффективности шлифования торцом круга ограничивается из-за большой площади контакта его рабочей поверхности с обрабатываемой поверхностью заготовки, и как следствие, высокой теплонапряженности процесса обработки.

Исследования и опытно-конструкторские работы, проведенные лабораторией абразивной обработки Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ) совместно с ОАО "Димитровградхиммаш", показали, что во многих случаях радикальным средством повышения технологической эффективности операций шлифования торцом круга являются композиционные шлифовальные круги (КШК), представляющие собой прерывистые шлифовальные круги (ПШК), конструктивные

элементы (пазы, прорезы или каналы) которых заполнены твердым смазочным материалом (ТСМ).

Разработаны гамма конструкций, технологии изготовления и применения КШК с запрессованными крепежными элементами для операций плоского торцового шлифования (рис. 1), а также чашечные цилиндрические и конические КШК с прорезами на бакелитовой или керамической связках для заточки режущего инструмента из быстрорежущих сталей и твердых сплавов (рис. 2). В составе ТСМ можно использовать как плавкие связующие типа технического воска или окисленного парафина, так и органические связующие – жидкий бакелит, пульвербакелит, эпоксидную смолу и др.

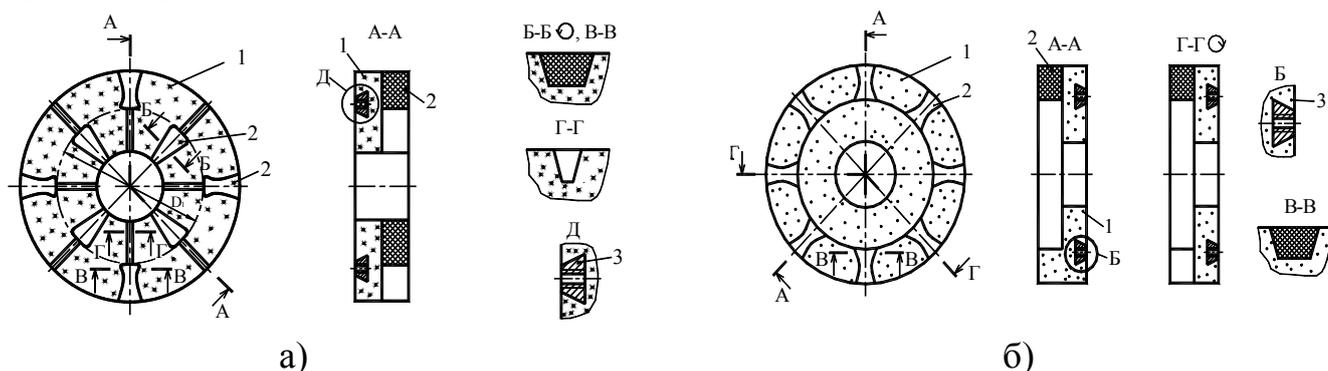


Рис. 1. КШК с запрессованными крепежными элементами: 1 – ПШК; 2 – ТСМ; 3 – крепежные элементы.

Оформление пазов в радиальном направлении в форме усеченной гиперболы (рис. 1) позволяет обеспечить постоянное отношение длины режущего выступа к длине рабочей поверхности смазочного элемента (СЭ) на различном удалении от оси вращения круга, исключить выпадение СЭ при вращении круга с рабочей окружной скоростью. Выполнение пазов в поперечном сечении в форме равнобочной трапеции с расположением ее основания со стороны рабочего торца позволяет легко извлекать шлифовальный круг из пресс-формы после его формования. Наличие прямолинейных радиальных пазов (рис. 1, а) в случае шлифования таким кругом заготовок с применением СОЖ, подаваемой через его центральное отверстие и проходящей через пазы, позволяет усилить ее моющее и охлаждающее действия в зоне обработки.

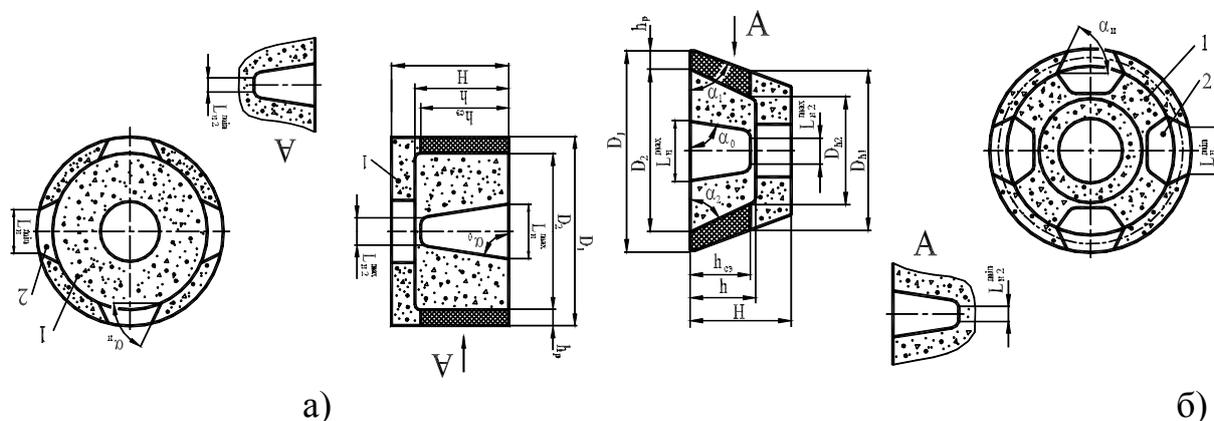


Рис.2. Цилиндрический (а) и конический (б) чашечные КШК: 1 – абразивная часть; 2 – ТСМ.

Лабораторные исследования и опытно-промышленные испытания КШК при

плоском торцовом шлифовании показали, что их применение позволяет повысить производительность обработки на (30 – 50) %, главным образом за счет снижения теплонапряженности в зоне шлифования. В качестве примера на рис. 3 приведены результаты исследования средней контактной температуры при плоском торцовом шлифовании заготовок из сталей ХВГ и Р6М5 композиционным кругом 11–125×45×32 25А25ПСМ16К20 с коэффициентом $\nu = 0,3$ и восемью радиальными прорезями длиной $L_i^{min} = 9$ мм. За базу для сравнения принимали результаты шлифования в идентичных условиях стандартными и прерывистыми кругами того же типоразмера и характеристики. Шлифовальные круги правили методом обтачивания, используя в качестве правящего инструмента алмазный карандаш 3908 – 0083 С2 (ГОСТ 607 - 80). Режим правки: 5 проходов со съемом 0,02 мм/дв.х; 3 прохода без подачи. Скорость продольной подачи алмазного карандаша – $0,2 \pm 0,05$ м/мин.

Как и следовало ожидать, наименьшие значения средней контактной температуры зафиксированы при шлифовании КШК во всем диапазоне варьирования врезной подачи. Например, при шлифовании КШК на врезной подаче $S_{вр} = 0,05$ мм/дв.х заготовок из стали ХВГ (рис. 3, а) ее контактная температура T_k была на 120 и 280 К меньше, чем при шлифовании соответственно прерывистыми и стандартным кругами; при шлифовании заготовок из стали Р6М5 (рис. 3, б) – соответственно на 160 и 314 К.

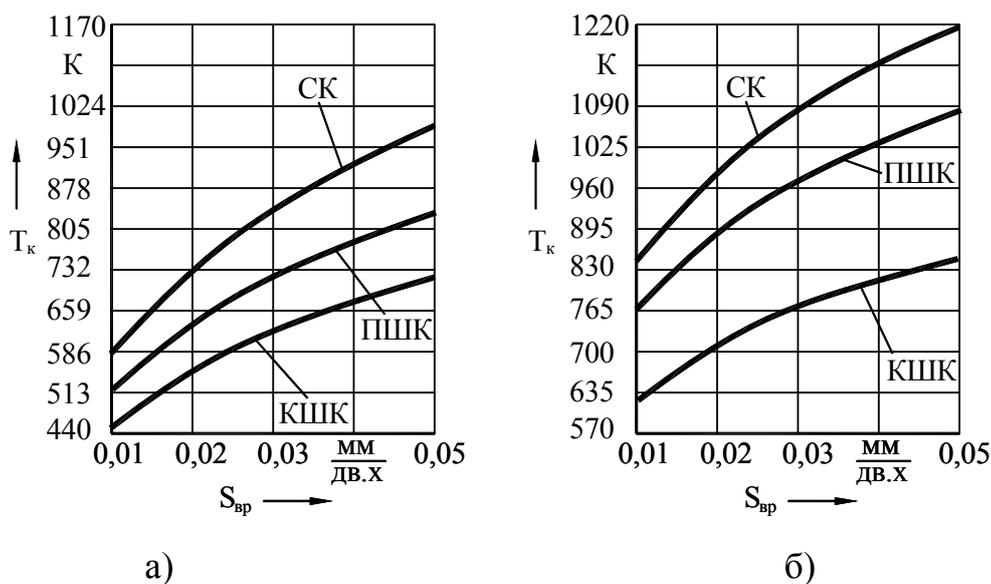


Рис. 3. Зависимость средней контактной температуры T_k от врезной подачи $S_{вр}$ и материала заготовки при плоском шлифовании торцом СК, ПШК и КШК: а, б – материал заготовки соответственно сталь ХВГ и Р6М5; круг 11–125×45×32 25А25ПСМ16К20; $V_c = 7$ м /мин, $V_k = 20$ м / с.

Таким образом, применение композиционных кругов при выполнении операций плоского торцового шлифования является эффективным средством повышения производительности процесса обработки или повышения качества шлифованных поверхностей.

2. ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.793.7

ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОЙ СТРУКТУРЫ НА КАЧЕСТВО ЗАКАЛЕННОГО СЛОЯ ГИЛЬЗЫ ЦИЛИНДРА ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННОГО ЧУГУНА ДВИГАТЕЛЯ ТИПА СМД

Скобло Т.С., докт. техн. наук, проф., **Сидашенко А.И.**, канд. техн. наук, проф.,
Поздняков Н.Г. (г. Харьков, Украина)

On the go influence of initial microstructure on quality of hard-tempered layer of shell of cylinder was considered. Chemical composition of shell is analysed. His influence on a microstructure and quality of tempering is appraised.

В предыдущей нашей работе [1] была представлена зависимость изменения коэрцитивной силы от глубины термоупрочненного слоя, которая имела вид, представленный на рис.1.

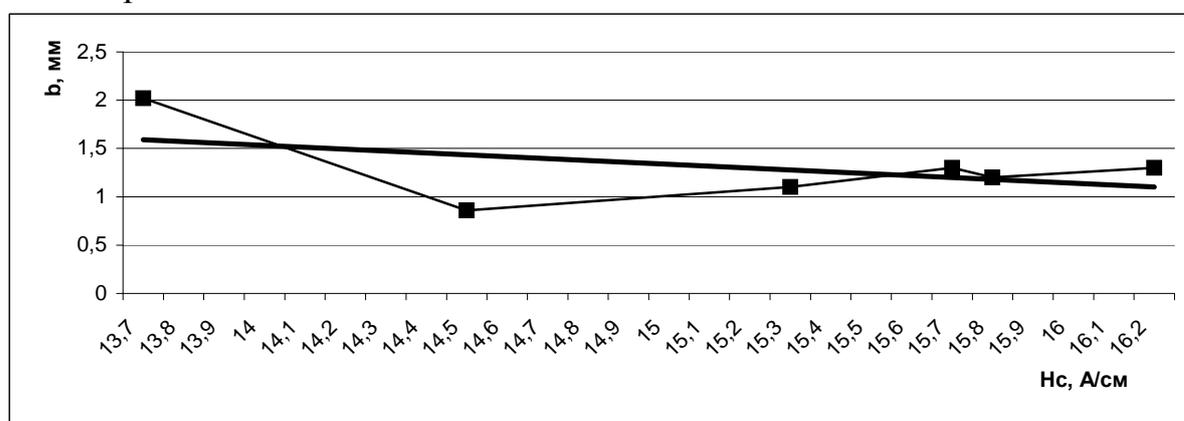


Рис. 1. Зависимость коэрцитивной силы от глубины упрочненного слоя.

Была поставлена задача установить, почему при постоянных параметрах обработки изменяется глубина закаленного слоя по высоте гильзы. Для выяснения этого фактора была разработана следующая методика проведения исследований:

- По высоте гильзы измеряли глубину упрочненного слоя;
- анализировали микроструктуру во всех этих зонах;
- определяли химический состав образцов.

В качестве исходных данных при выполнении данной работы служили технические требования на изготовление закаленных ТВЧ гильз цилиндров двигателей типа СМД. При производстве этих деталей используют низколегированный чугун (табл.1).

Таблица 1.

Химический состав серого чугуна (массовая доля элемента в %).

C	Si	Mn	Cr	Ti	Cu+Ni	P	S
2,9-3,6	1,6-2,5	0,5-1	0,25-0,6	0,05-0,1	0,4-0,85	≤0,2	≤0,1

Основные требования предъявляются к структуре и свойствам металла:

- металлическая основа чугуна должна иметь пластинчатый перлит (П...П 96);
- глубина закалённого слоя должна находиться в пределах $0,4 - 3,0 \pm 0,1$ мм;
- твёрдость закалённого слоя в пределах 35 – 60 HRC.

В результате закалки изменяются структура чугуна его механические свойства – твердость, прочность, износоустойчивость и другие свойства, повышающие эксплуатационную надежность и долговечность деталей машин. Качество закалки зависит от режимов температуры и скорости нагрева, времени выдержки и скорости охлаждения. Гильзу цилиндра, изготовленную из чугуна, подвергали предварительной обработке при движении индуктора «вниз». При этом обеспечивали предварительный нагрев поверхности до 180-190°C, что обеспечивает не очень резкую закалку. Повторный нагрев до температуры фазовой перекристаллизации осуществляли при подъеме индуктора «вверх» с последующим спрейерным охлаждением водой.

Температуру нагрева под закалку определяли по положению критических точек на диаграмме состояния железо-углерод [2].

Для поверхностного упрочнения чугуна применяли высокочастотную закалку. Однако индукционный (ускоренный) нагрев чугуна имеет характерные особенности. Так, например, повышенное содержание кремния в сером чугуне приводит к смещению фазовых превращений в процессе нагрева в область более высоких температур. Малая теплопроводность чугуна может привести к резкому перепаду температуры по сечению отливки в процессе индукционного нагрева, а после быстрого охлаждения – к структурной неоднородности. Графитные включения, как и цементит перлита, являясь источниками диффузии углерода, способствуют определенному насыщению металлической основы чугуна углеродом. При этом предельное насыщение углеродом происходит лишь в участках, непосредственно прилегающих к источнику диффузии [3].

Как показали исследования, не только закалка влияет на микроструктуру, но и исходная микроструктура оказывает влияние на качество закалки.

Так, при анализе микроструктуры образцов гильз двигателя типа СМД были получены следующие результаты.

В местах, где глубина упрочненного слоя была наибольшей, наблюдалось скопление пор (рис. 2).



Рис. 2. Поры в чугуне гильзы, $\times 100$.

Можно предположить, что наличие пор способствует аккумуляции тепла и более интенсивному прогреву в таких областях.

В работе [4] проводили анализ гильз различного химического состава, который показал, что при повышенном содержании фосфора в гнездах графита выявляется наличие микропористости.

После проведения спектрального анализа химического состава исследуемых образцов с пористостью у обрабатываемой поверхности выявилось, что в местах нахождения микропористости наблюдается повышенное содержание фосфора. Химический анализ испытуемых образцов показал следующее (табл. 2).

Содержание химических элементов в испытуемых образцах

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
3,38	2,32	0,98	0,156	0,04	0,42	0,12	0,42

У наружной поверхности гильзы концентрация фосфора не превышала 0,150%, а в местах скопления микропористости его концентрация доходила до 0,4%. Наблюдаемая неравномерность связана с технологией отливки гильзы центробежным методом, при котором примеси оттесняются на внутреннюю поверхность. Металлографическим анализом установлено, что в гильзах с повышенной концентрацией фосфора такая пористость для гильз с чистовой обработкой сечением 7-13 мм располагается на глубину до 4,5 мм от внутренней поверхности.

Полученные результаты должны быть использованы при производстве гильз цилиндров. Выявление пористости и отбраковка гильз с повышенной концентрацией фосфора должна производиться до термической обработки.

Избежать появления пористости в таких гильзах возможно и при увеличении толщины литой заготовки до 20 мм.

Литература: 1. Оценка качества закаленных ТВЧ гильз по коэрцитивной силе. Т.С. Скобло, Н.Г. Поздняков, Физические и компьютерные технологии. Труды 10-й Международной научно-технической конференции, 28-30 сентября 2004г. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2004. – 288 с. 2. Николаев Е.Н., Коротин И.М. Термическая обработка металлов токами высокой частоты. М.: "Высшая школа", 1977, - 214 с. 3. Русин П.И. Основы термической обработки чугуна при индукционном нагреве. – Ростов-на-Дону: Ростовский госуниверситет, 1967. – 134 с. 4. Чугуны из гильз цилиндров автомобильных двигателей. М.: НИИ-ИАП, 1978, 71 с.

УДК 621.923

УПРОЧНЕНИЕ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЕТАЛЕЙ МИКРОЛЕГИРОВАНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ ТЭС

Скобло Т.С., докт. техн. наук, Власовец В.М., канд. техн. наук, Ридный Р.В.
(г. Харьков, Украина)

The results of experimental researches of influencing of additions are resulted – the TES wastes in a gumboil on properties on the depth of the inflicted layer of the details restored by causing of coverages by an elektrodugovim method

Восстановление изношенных деталей нанесением покрытий является одним из распространённых методов ремонта машин. О перспективности и важности решаемых при этом задач свидетельствует неослабевающий научный интерес к этим вопросам. В Германии (г. Холле) 14 – 15 июня 2004г. состоялась 5-я Международная конференция «Защита конструкций от износа посредством наплавки и нанесением покрытий», на которой рассматривались важнейшие научные разработки в области наплавки и покрытий. Наряду с рассмотрением новых технологий, уже прошедших производственную проверку, и обеспечивающих повышение ресурса деталей, очень большое внимание уделено восстановлению изношенных деталей нанесением покрытий [1].

Методы механизированного процесса нанесения покрытий под слоем флюса, получившее широкое распространение в 70-80 годах прошлого столетия остаются весьма перспективными, т.к. наряду с высоким качеством выполняемых работ они обеспечивают автоматизацию процессов и широкую возможность управления

структурообразованием физико-механическими характеристиками.

Очевидно, что на химсостав, структуру и физико-механические свойства оказывают влияние используемые композиции проволоки и флюса.

Целью настоящей работы является изучение возможности повышения качества и свойств наносимых под слоем флюса покрытий с применением специальных добавок во флюс, обеспечивающих их микролегирование. Такое направление исследований позволит обеспечить требования ТУ при применении менее дефицитных материалов для покрытий.

В общем машиностроении высококремнистые марганцевые флюсы общего назначения АН-348А и АН-348М получили преимущественное применение в процессах механизированного нанесения покрытий при использовании для них низкоуглеродистых и низколегированных проволок. В связи с этим для исследований был принят флюс АН-348А.

Флюсы, используемые для нанесения покрытий на детали из низколегированных сталей должны обеспечивать повышенную прочность и твёрдость при достаточно высоких значениях ударной вязкости и износостойкости. Если прочность и химический состав металла покрытия в большей мере определяется его составом и основного металла, то ударная вязкость в значительной степени зависит от состава флюса. Для получения необходимого уровня ударной вязкости металла покрытия необходимо обеспечить мелкое зерно, а также низкое содержание вредных примесей и неметаллических включений [2].

При нанесении покрытий необходимо обеспечить возможно низкое содержание водорода, что достигается путём применения флюсов с повышенной окислительной способностью. При этом необходимую прочность покрытия может достигаться легированием марганцем, хромом, никелем, молибденом и ванадием, а не за счёт повышения содержания в нём углерода, который будет способствовать склонности покрытия к образованию горячих трещин [2].

Таким образом одним из направлений обеспечения высокого качества наносимых покрытий является обоснованное внесение определённых добавок во флюс, обеспечивающих с одной стороны микролегирование и получение мелкозернистой структуры покрытия, а с другой – отсутствие грубых неметаллических включений и их скоплений. Само по себе внесение добавок во флюсы не является новым. Так институтом электросварки им. Е.О. Патона для повышения стойкости швов и покрытий против образования пор предложен и выпускается промышленностью керамический флюс-добавка марки АНК-3, применяемый в смеси с плавленными флюсами АН-348А, ОСЦ-45, АН-60 и др. Известны и предложения по использованию отходов различных производств при изготовлении флюсов, удешевляющих их производство без понижения качества. Как показано в работе [3], сырьевая база производства покрытий электродов и флюсов может быть существенно расширена путём использования отходов химической, оборонной, витаминной и других отраслей промышленности. Это позволит в значительной мере утилизировать отходы, сберечь первичное сырьё, существенно удешевить продукцию. В работе [4] исследована возможность использования в составе сварочного флюса отходов сернокислого производства, включающих в себя окислы ванадия.

В настоящей работе изучали возможность использования отходов (шлаков) от сжигания угля на Змиевской ТЭС. В его химическом составе золы были обнаружены следующие элементы (таблица).

Химический состав % золы Змиевской ТЭС

№ пробы	Si	Al	Fe	Mg	Cu	Mn	Cr	Ti	V	P
1	57	14,2	19,3	2,0	0,6	0,45	0,12	1,5	0,12	0,02
2	62	12,7	20,0	1,9	1,0	0,6	0,15	1,2	0,17	0,03

Исследовали возможность использования этой добавки к флюсу АН-348А для повышения качества и физико-механических характеристик покрытий при восстановлении изношенных деталей. Поскольку отходы ТЭС представляют собой смесь частиц различных размеров от пылевидных до крупнокусковых, то для добавок их во флюс проводили специальную подготовку: крупные фракции дробили, произво-

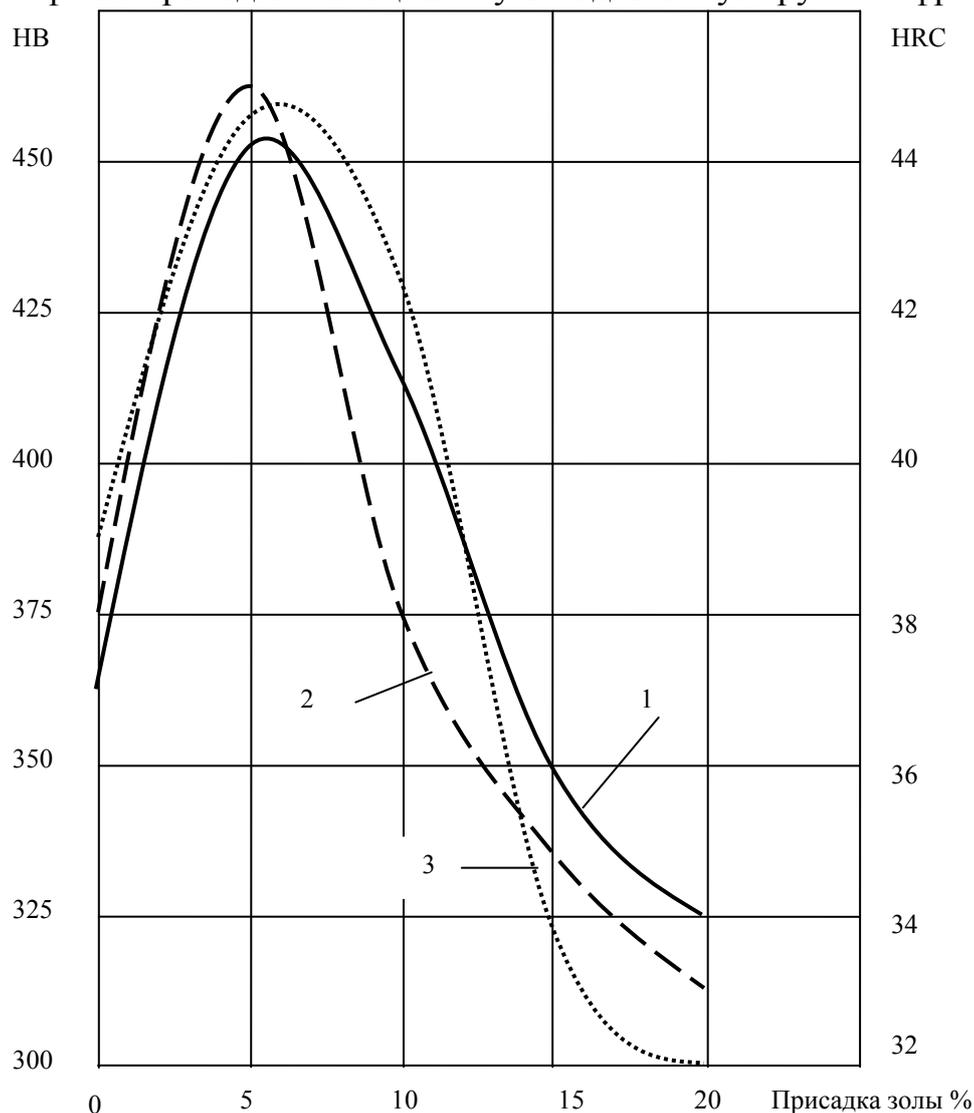


Рис. 1. Зависимость твердости покрытия от доли введения золы во флюс: 1 – HV 750, 2 – HV 3000, 3 – HRC.

дрили отсев пылевидных частиц с последующей сортировкой на решётах. Для добавки во флюс отбирали фракции с размерами соизмеримыми с зёрнами флюса. При экспериментальном нанесении покрытий использовали только стандартный флюс АН-348А, а также этот флюс с добавками 5; 10; 15 и 20% шлака ТЭС. Покрытия наносили на специально оборудованной установке, включающей токарный станок и комплект оборудования для автоматического нанесения покрытий на цилиндрическую заготовку диаметром 80мм из стали 40Х проволокой Нп-30ХГСА. Затем из заготовок, с различной долей присадок вырезали образцы для исследования твердости и химсостава. Результаты исследований представлены на рис. 1, 2.

Влияние количества вводимой золы во флюс на твердость поверхностного слоя покрытия, не подвергавшегося механической обработке, приведены на рис. 1. Твердость измеряли различными способами. В каждом опыте проводили по 4 замера, по которым вычислялось среднее значение твердости. Замеры твердости по Бринеллю

выполняли шариками диаметром 5 и 10мм. Меньший диаметр шарика позволяет использовать меньшие нагрузки и локализовать зону измерений, а больший шарик – получить более усреднённые показатели и уменьшить ошибку оператора при проведении эксперимента.

Полученные зависимости выявили существенное влияние количества вводимой добавки во флюс на твёрдость покрытия. Зависимости твёрдости, полученные различными способами, имеют идентичный характер с явно выраженным оптимумом в области содержания добавки золы в количестве 5,0...7,2%. Внесение добавки больше 10...13% ухудшало качество покрытия, понижая его твёрдость до значений меньших, чем в покрытии без добавки.

Определение характера микротвёрдости по глубине покрытия важно с точки зрения выбора величины припуска на механическую обработку и управлением процесса износа восстановленных деталей при их эксплуатации.

На рис. 2 приведены результаты исследования микротвёрдости по глубине покрытия от поверхности к матрице от количества вносимой во флюс золы. Все зависимости имеют сложный характер и имеют по два экстремума. Начиная с приповерхностного слоя

микротвёрдость вначале падает до глубины ~1,5мм а затем возрастает до максимального значения в переходной зоне на глубине 2,5...3,5 мм. При этом получено увеличение микротвёрдости от min до max значений в среднем в 1,5 раза. Лучшие результаты достигнуты при введении в состав флюса 5% шлака, а худшие – при введении 15-20%.

В дальнейших исследованиях необходимо оценить влияние добавок зпалы на структурообразование: величину зерна, наличие неметаллических включений (их размер и

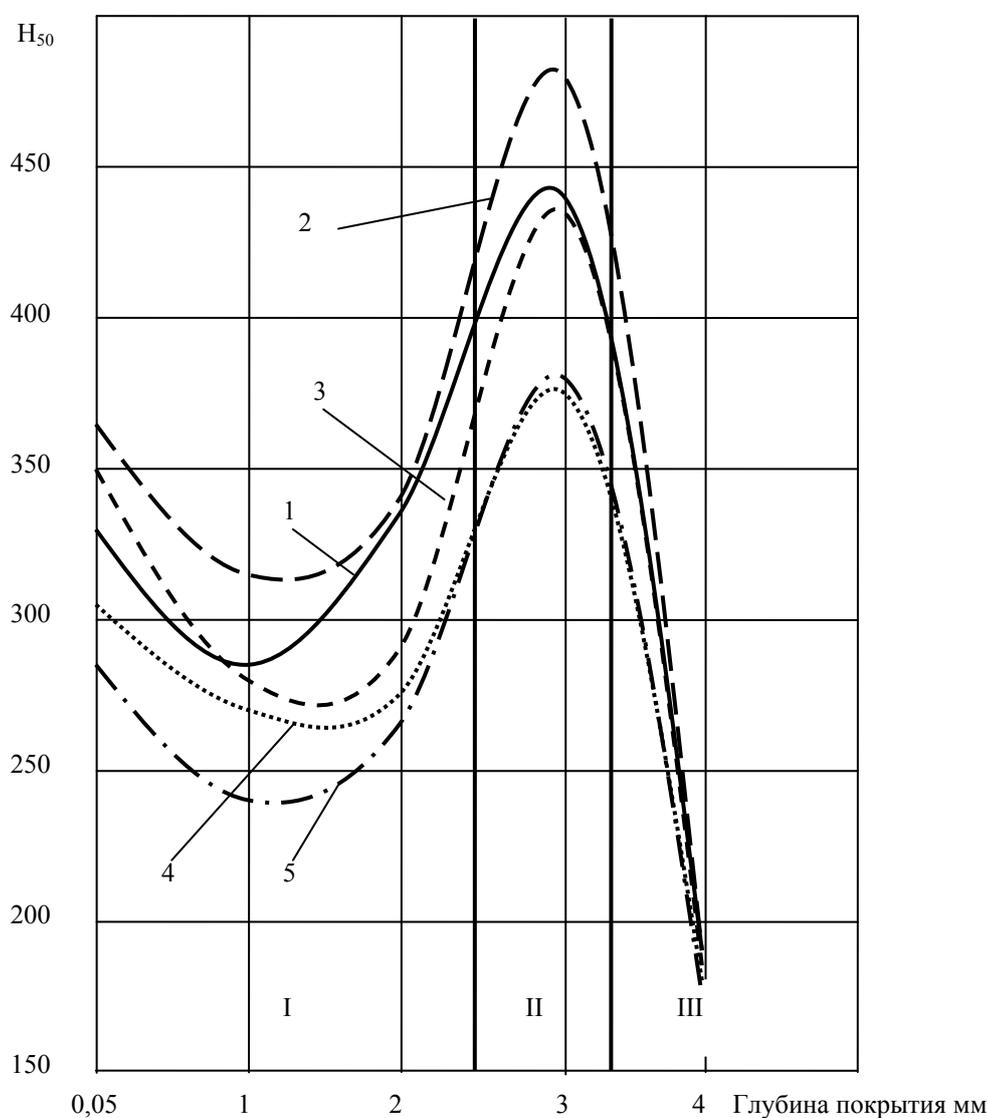


Рис. 2. Зависимость микротвёрдости покрытия по глубине (от поверхности к матрице); I - покрытие; II - переходная зона; III - матрица. 1- без добавления золы, 2 – 5% золы, 3 – 10% золы, 4 – 15% золы, 5 – 20% золы.

распределение) пор. Это позволит объяснить причины изменения твёрдости и распределение микротвёрдости по сечению покрытия.

Вывод. 1. Экспериментальным путём подтверждена эффективность использования отходов производств (золы ТЭС) в качестве добавок к флюсу АН-348А при нанесении покрытия электродуговым способом. 2. Наилучшие результаты получены при добавке золы во флюс 5...7%. При этом получено увеличение твёрдости в 1,2 раза в сравнении с нанесением покрытий без добавок. Происходит также изменение и микротвёрдости как в зависимости от введения добавок, так и по глубине наносимого покрытия.

Литература: 1. Verschlebschutz von Bauteilen durch Auftragschweiben. Blech Rohre Profile. 2004. 51, №4, - р.12. 2. Сварочные материалы для механизированных способов дуговой сварки / В.Г. Свещинский, В.И. Галинич, Д.М. Кушнарёв, А.М. Суптель. – М: Машиностроение, 1983, - 102 с. 3. В.Г. Лозовой, Л.П. Майков. Состояние сырьевой базы для производства сварочных материалов. Сварочное производство. 1996, №1,2, с. 24-25. 4. Исследование применения отходов производства в составе сварочных флюсов. Тютюков С.А., Истомин С.Г. и др. Сварка Урала 2002. Тезисы докладов 21 научно-технической конференции сварщиков уральского региона. Курган. Изд-во Курганского государственного университета. 2002, с. 48-49.

УДК 621.793.7

ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАТОРА И ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА КАЧЕСТВО И СВОЙСТВА ВТУЛКИ ЦИЛИНДРА МАЛЫХ СУДОВ И ОЦЕНКА ИХ ПО КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЕ

Скобло Т.С., докт. техн. наук, проф., **Власовец В.М.**, кан. техн. наук, **Марченко М.В.** (г. Харьков, Украина)

In work is organized analysis influence modifier and alloyed element on quality and characteristic of the bushing of the cylinder small court, and estimation them on coercitive to power.

Повышение качества серого чугуна и получаемых из него отливок достигается различными металлургическими и технологическими приёмами, наиболее распространённым и перспективным из которых является модифицирование жидкого чугуна. Существуют различные способы модифицирования, предназначенные для получения определённых эксплуатационных свойств отливок в конкретных производственных условиях.

В последнее время получает распространение микролегирование жидкого чугуна, которое по способу ввода добавок (в количестве сотых и десятых долей процента от веса металла) и механизму действия почти не отличается от модифицирования. В большинстве случаев оно предназначено для стабилизации перлита и предотвращения ферритизации чугуна в массивных сечениях.

Легирование чугуна такими элементами, как хром, медь, никель, молибден и марганец, их влияние на свойства и структуру серого чугуна с пластинчатым графитом хорошо известны [1-2].

Влияние химических элементов (особенно количественное), входящих в состав модификаторов, изучено значительно меньше, чем влияние тех же элементов, содержащихся в обрабатываемом чугуне. Это объясняется тем, что конечный результат модифицирования зависит в решающей степени от технологии ввода модификатора, температурных и временных параметров, химического состава исходного чугуна и толщины стенки отливки [3].

Исходя из изложенного выше была поставлена задача определить вклад легирующих и модифицирующих добавок на изменение коэрцитивной силы во втулках малых судов.

Методом спектрального анализа по месту измерения твёрдости и коэрцитивной силы проверили концентрацию Si и легирующих компонентов Ni и Cu (табл. 1).

Таблица 1

Концентрация химических элементов в исследуемых зонах

Номер образца	Концентрация химических элементов %			
	Зона	Si	Ni	Cu
	Коэффициент корреляции с коэрцитивной силой			
	1	0,07	0,85	-0,8
	2	-0,03	0,85	-0,83
	Коэффициент корреляции с измеренной твердостью			
	1	-0,08	0,65	-0,63
	2	-0,07	0,78	-0,79
№ 2-1	1	2,06	1,15	0,44
	2	2,07	1,17	0,43
№ 2-2	1	2,05	1,16	0,45
	2	2	1,14	0,42
№ 7-2	1	2,23	1,16	0,44
	2	2,13	1,14	0,42
№ 53-2	2	2,11	0,44	0,7
№ 55-1	1	2	0,43	0,65
	2	2,04	0,45	0,69
№ 55-2	1	2,06	0,45	0,7
	2	2,01	0,44	0,66
№ 75-1	1	2,07	0,43	0,66
	2	2	0,44	0,64
№ 75-2	1	2	0,45	0,7
	2	2,02	0,44	0,68

Исследованиями установлено, что колебания твердости в чугуне, содержащем C = 2,95-3,33%, Si = 1,98-2,23%, Ni до 1,17% и Cu до 0,7% не превышают 7-10% от градуировочной прямой (рис. 1), такие же изменения соответствуют и коэрцитивной силе (изменяется от 14,4 до 15,7А/см при замерах тангенциальных и до 16,1 А/см при - радиальных). Это дает основание для построения градуировочной шкалы, представляющей собой линейную зависимость между рассматриваемыми характеристиками. Для уменьшения погрешности проводили оценку коэрцитивной силы отдельно для наружного и внутреннего слоев стенки такого типа втулок, для чего выполнили расчет и построение двух линейных зависимостей рис.1. При этом ошибка составляет от 0 до 2,5% для легированного металла и от 0 до 7,5% для чугуна, содержащего до 0,5%Ni, 0,5%Cu и 0,5%Mo.

Как видно из исследований, уровень H_c находится в тесной связи со структурой материала и его химическим составом. В зависимости от концентрации легирующих и модифицирующих компонентов коэрцитивная сила может возрасти в 1,76 раза (только

при увеличении концентрации никеля выше значений ТУ).

Локальным спектральным анализом на установке “Спрут” (диаметр пятна 4 мм) в зонах с минимальной твёрдостью 201 НВ [образцы 324 – 6 (3) и 324 – 4(2)] выявлена повышенная концентрация углерода 4,2 – 4,48%, что соответствует эвтектическому и заэвтектическому чугунам где кристаллизуется грубый первичный графит. Концентрация углерода в этих зонах превышает требования ТУ. Основные химические элементы, оговоренные ТУ: Si, Mn, Cr, Mo, Ni, Cu, P, S находятся в допустимых пределах (табл. 2). Влияние скорости кристаллизации анализировали по показаниям твердости и коэрцитивной силы на одной втулке №324. При сопоставительных испытаниях по этим показаниям с другими втулками было установлено, что они в меньшей мере зависят от скорости кристаллизации, а в большей – от ликвации химических элементов.

Кроме основных элементов выявлены малые концентрации: Al, Co, Nb, V, W, Pb, Mg, As, Ce, Zr, Fe (табл. 3). Причём содержание модификаторов Ce, Zr и Mg не является стабильным. Можно предположить, что эти компоненты как и углерод входят в состав модифицирующей присадки, которая неравномерно распределяется в заготовке. Это подтверждается их ликвацией в сопоставляемых зонах.

Таблица 2

Химический состав исследуемых втулок и концентрация элементов по НТД

Образец №	Массовая доля элементов										
	C	Si	Mn	Ni	C+Si	Cu	Cr	Mo	Ti	P	S
										Не более	
НТД	3,1-3,5	1,8-2,3	0,7-1,2	0,3-0,6	5,3-5,7	0,8-1	0,35-0,5	0,3-0,6	0,05-0,12	0,15	0,1
324	3,3	2,23	0,82	0,4		0,97	0,4	0,43	0,056	0,07	0,05
324(4) - 1	3,216	2,18	0,863	0,48		0,91	0,32	0,41	0,075	0,12	0,07
324(4) - 2	4,2	2,16	0,853	0,47		0,86	0,32	0,42	0,063	0,13	0,08
324(6) – 1	3,63	2,14	0,871	0,48		0,89	0,32	0,42	0,07	0,12	0,06
324(6) – 2	3,67	2,1	0,856	0,48		0,88	0,31	0,4	0,07	0,12	0,06
324(6) – 3	4,48	2,05	0,895	0,48		0,8	0,33	0,45	0,07	0,14	0,07

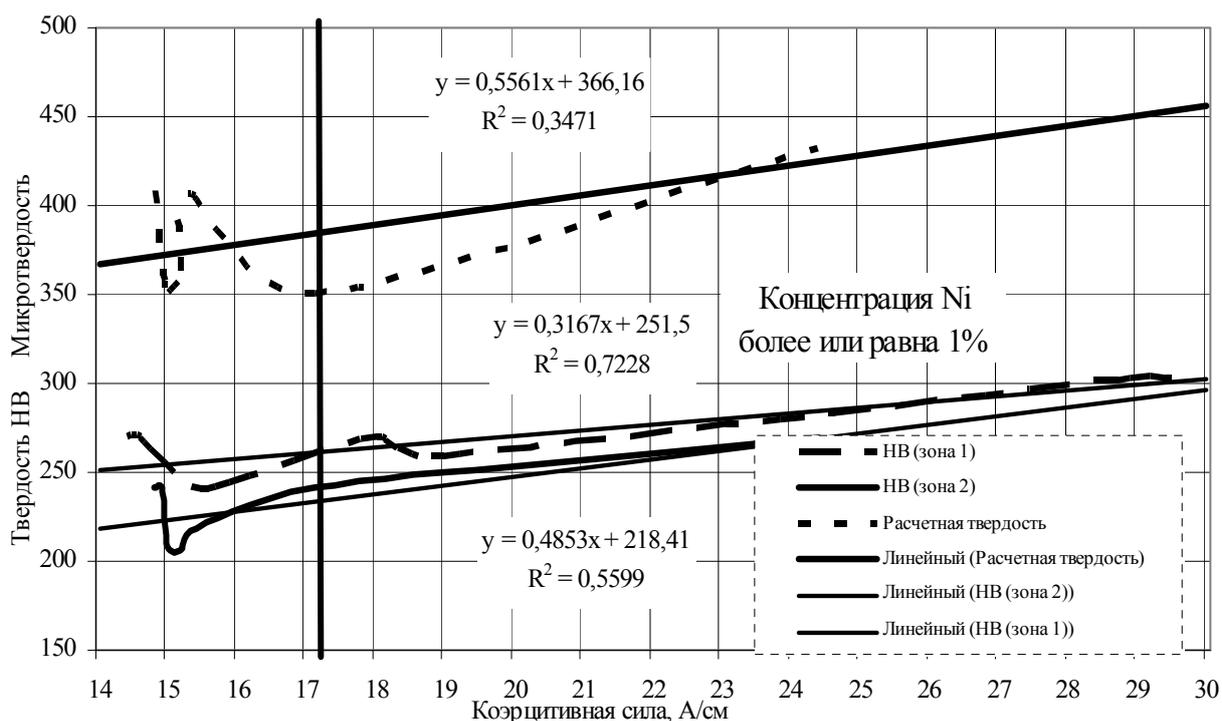
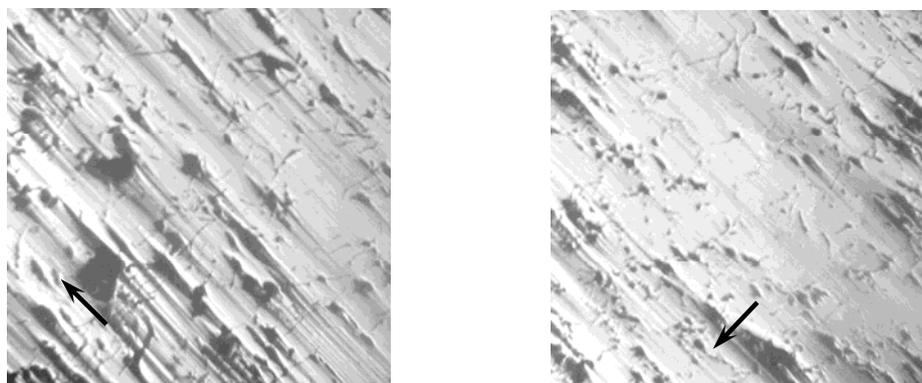
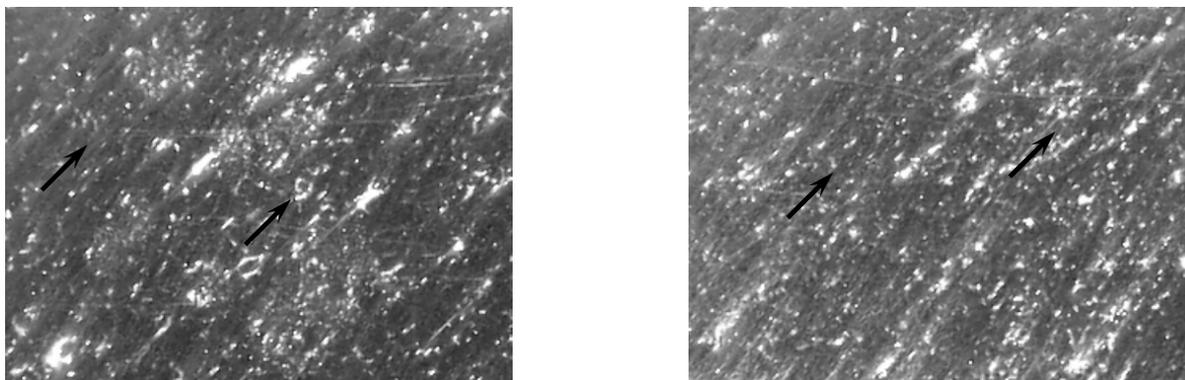


Рис.1. Зависимость коэрцитивной силы от измеренной и расчетной твердости.

Химический состав и концентрация элементов не входящих в состав отливки

Образец №	Массовая доля элементов												
	Al	Co	Nb	V	W	Pb	Mg	As	Zr	Ce	Te	B	Fe
324(4) - 1	0.002	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.002	0.0006	0.0089	0.0014	<0.0003	0.013	0.0018	91.4
324(4) - 2	0.002	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.002	<0.0001	0.0117	0.001	0.0014	0.017	0.0018	90.5
324(6) - 1	0.0027	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.002	0.0006	0.009	0.0011	<0.0003	0.013	0.0017	91.0
324(6) - 2	0.0022	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.002	0.0004	0.0113	0.0011	0.0005	0.014	0.0017	91.1
324(6) - 3	0.0015	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.002	<0.0001	0.0108	<0.001	0.0021	0.018	0.0019	90.3

Кроме того, во втулках с низкой твёрдостью выявлено значительное количество пор. Так, при 170 – 207 НВ (№ 369) доля пор составляла: в наружной поверхности – 22%, средней части – 7,4% в поле зрения шлифа, и во внутренней – 5% (рис. 2, 3). Их появление, с учётом выявленной ликвации компонентов модификатора, предположительно может быть связано с повышенной его влажностью. Количественную оценку доли пор проводили по площади занятой на шлифе статистическим методом с использованием компьютерной программы.

Рис. 2 Поры в чугуне втулки, $\times 100$.Рис. 3 Поры в чугуне втулки (микроскоп QX3), $\times 60$.

В связи с выявленной ликвацией компонентов распределение фаз в этих втулках не имеет каких-либо закономерностей.

В зонах с повышенной твёрдостью выявлены отдельные, скопления и плёночные неметаллические включения. При изготовлении шлифов они разрушаются, выкрашиваются и оставляют след в виде царапины. Поскольку царапина глубокая, вывести её длительной полировкой не представляется возможным. В ряде случаев в неё попадает грязь (графит) и создается впечатление плохой подготовки шлифа.

Выявленные неметаллические включения могут быть отнесены (по цвету и форме) к карбидам и карбонитридам титана и циркония. Их образование приводит к уменьшению доли графита за счёт перераспределения углерода. В этом случае коэрцитивная сила возрастает до 20 – 27 а/см. Согласно ТУ выделение цементита и карбидо-содержащих фаз не допускается.

В результате проведенных исследований для втулок малых судов было определено, что отклонение по твёрдости и коэрцитивной силе связаны с ликвационными процессами.

Так, при ликвации углерода и его содержании 4,2 – 4,48% приводит к понижению коэрцитивная сила снижается, в следствии выделения грубого первичного графита.

При вводе влажного модификатора была зафиксирована значительная пористость металла и так же падение коэрцитивной силы и твёрдости.

Отклонения твёрдости выше верхнего предела ТУ – определяются скоплениями нитридов и карбонитридов титана и циркония, которые выделяются как в виде отдельных включений, скоплений, так и в виде сетки. В последнем случае это приводит к появлению значений твёрдости равных 277 – 295 НВ. При твёрдости ниже нижнего предела (170 – 210 НВ) выделяется грубый первичный графит и коэрцитивная сила существенно падает ≤ 14 А/см. Наблюдаемое связано с ликвационными явлениями и может быть отнесено к неравномерному распределению модификатора.

Литература: 1. Пивоварский Е. Высококачественный чугуны. Перевод с нем. Е. К. Захарова. Под ред. И. Н. Богачева и Б. Г. Ливишца. Т. 1 М.: Металлургия, 1965.- 650 с. 2. Гиршович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. М. – Л. Машиностроение [Ленинградское отделение], 1966.- 562 с. 3. Комисаров. В. А. Повышение качества отливок модифицированием и микролегированием серого чугуна. М.: НИИМАШ, 1968.- 50 с.

УДК 621.777; 658.567

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ И СИЛОВОГО РЕЖИМА ВЫДАВЛИВАНИЯ В УСЛОВИЯХ РАДИАЛЬНОГО И ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ

Евстратов В.А., Кротенко Г.А., Левченко В.Н., (г. Харьков, Украина)

The article shows the results of theoretical analysis of extrusion process when the detail has variable along the perimeter wall thickness. In the first part of the article radial flow of metal is examined; second part devoted to the vortical flow.

В различных отраслях приборостроения и электроники широко применяются детали коробчатой формы, в том числе с круглыми и многогранными полостями. Подобные детали целесообразно изготавливать холодным выдавливанием. Применение этого малоотходного и высокопроизводительного метода обработки металлов давлением позволяет повысить коэффициент использования металла до 0,85...0,95 и довести производительность до 20...40 деталей в минуту. Именно таким образом уже изготавливают детали достаточно простой формы, например, квадратные или

прямоугольные тонкостенные корпуса реле и приборов, разно-образные экраны и многие другие. Однако сегодня требуются высокоэффективные и конкурентоспособные технологии изготовления деталей более сложной формы, в том числе с переменной по периметру толщиной стенок.

Выдавливание коробок и других деталей с переменной по периметру толщиной стенки характеризуется значительной неравномерностью деформации, поэтому высота детали получается переменной по периметру. Подобный дефект в обработке металлов давлением получил название фестонов. Образование фестонов вынуждает увеличить расход металла и ввести дополнительную довольно трудоемкую операцию – подрезку торца. Чтобы повысить экономичность выдавливания, необходимо предотвратить образование фестонов. По этой причине при выдавливании деталей с переменной по периметру толщиной стенки необходимо учитывать кинематические особенности процесса.

Особенности деформации (образование фестонов и даже разрывы стенок из-за неравномерной деформации), силовой режим и предельные возможности процесса выдавливания таких деталей в настоящее время проанализированы либо только экспериментально, либо с использованием допущения о плоском или осесимметричном течении металла [1-3]. Полученные результаты носят узко конкретный характер и явно недостаточны. Поэтому все более остро ощущается необходимость в разработке методики построения математических моделей процессов выдавливания в условиях неосесимметричного течения. К сожалению, теоретический анализ процессов трехмерного течения, когда $v_x \neq 0$; $v_y \neq 0$; $v_z \neq 0$ (или в цилиндрической системе координат $v_r \neq 0$; $v_\theta \neq 0$; $v_z \neq 0$), описан только в общем виде и о таких процессах сказано, что их теоретический анализ представляет исключительно сложную задачу [4,5].

В данной работе для построения математической модели процесса выдавливания деталей с переменной по периметру толщиной стенки использован энергетический метод, который основан на балансе мощностей внешней деформирующей силы и внутренних сил сопротивления деформации, контактного трения и сдвига [4,5]. Два основных уравнения энергетического метода позволяют проанализировать как силовой режим, так и особенности формоизменения процесса выдавливания.

Для демонстрации возможностей предлагаемого метода рассмотрим задачу анализа процесса выдавливания детали упрощенной конфигурации в виде квадратной призмы с цилиндрическим отверстием (рис.1, а).

Анализ процессов обработки давлением с трехмерным течением – исключительно сложная задача. Она упрощается, когда движение материальных частиц деформируемого тела описывается в цилиндрической системе координат. Для цилиндрической системы координат ($v_r \neq 0$, $v_z \neq 0$, $v_\theta = 0$) условие постоянства объема имеет вид

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0.$$

Это дифференциальное уравнение содержит две неизвестные функции v_r и v_z . Поэтому, если задать функцию v_r (или v_z), то можно однозначно найти v_z (или v_r). Такой подход позволяет свести трехмерную задачу к осесимметричной и для многих практически важных процессов выдавливания получить решение с приемлемой точностью [4].

Применительно к поставленной задаче можно принять расчетную схему, показанную на рис.1, б, согласно которой заготовка условно разделена на четыре области: 1, 2 и 4 – пластические, а 3 – жесткую. Это соответствует рассмотрению процесса выдавливания высокой заготовки, в которой очаги пластической деформации под пуансоном 1, 2 и дно матрицы разделены жесткой зоной 3. Зона 4 пластическая потому, что в ней происходят сдвиги, так как компонента скорости v_z оказывается переменной по координате θ , вследствие чего и происходит образование фестонов на торце выдавливаемой детали.

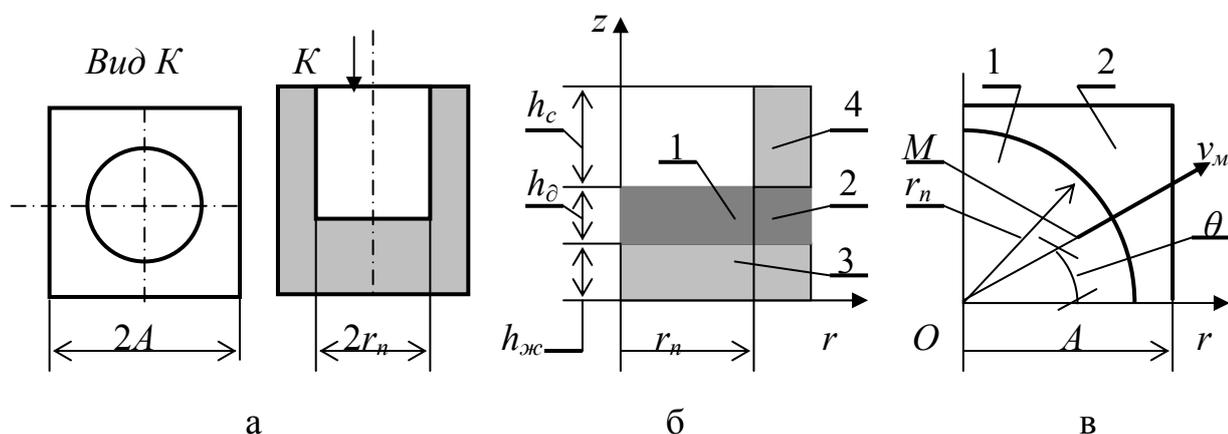


Рис.1. Выдавливаемая деталь (а), схема ее разбивки на зоны (б) и схема радиального течения в зонах 1 и 2 (в).

Принимаем следующие упрощающие допущения: материал заготовки жесткопластичен, однороден и несжимаем, деформации в пластических зонах однородные, а сдвиги сосредоточены на границах областей.

Компоненты скоростей деформации, входящие в основное уравнение энергетического метода, представим в виде так называемых подходящих функций, исходя из граничных условий и условия постоянства объема. Анализ опубликованных данных и многочисленные расчеты показывают, что вид подходящих функций скоростей незначительно влияет на усилие деформирования. Это позволяет при анализе процессов со сложной кинематикой течения металла использовать сравнительно простые разрывные функции, получая при этом решение с достаточной для практики точностью.

В рассматриваемом на рис.1 случае в очаге пластической деформации все три компоненты скоростей v_r , v_θ , v_z каждой материальной частицы (например, частицы М на рис.1, в) отличны от нуля. Однако, как показывает опыт [2,3], на начальном этапе деформации энергетически более выгодным оказывается схема чистого радиального течения металла. При этом, в связи с переменной по периметру толщиной стенки на верхнем торце выдавливаемой детали формируется фестон – торец заготовки приобретает волнообразность.

Поэтому процесс выдавливания детали разделим на две стадии: 1) начальную, при которой справедлива схема радиального течения металла, скорость v_z в зоне 3 получается переменной по θ , в связи с чем происходит формирование фестонов, и 2) заключительную, при которой сформировавшаяся стенка высотой h_c влияет как жесткий конец и выравнивает по углу θ скорость v_z . На этой стадии размеры сформированного фестоны уже не изменяются, а так как толщина стенки по θ переменна, то это приводит к формированию вихревого течения в зонах 1 и 2, при котором $v_\theta \neq 0$.

0.

Для первой стадии формоизменения заготовки (радиального течения) можно использовать такие подходящие функции, описывающие течение металла в зонах 1, 2 и 4 (зона 3 – жесткая, поэтому в ней все компоненты скоростей равны нулю), удовлетворяющие граничным условиям

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{z1} = -\frac{v_n}{h} [z - (h_\partial - h)]; \quad v_{r1} = \frac{v_n}{2h_\partial} \cdot r; \quad v_{\theta 1} = 0; \\ v_{z2} = \frac{v_n}{h} [z - (h_\partial - h)] \cdot f(\theta); \quad v_{r2} = \frac{v_n}{2h_\partial} \cdot \frac{(A^2 - r^2 \cos^2 \theta)}{r} \cdot f(\theta); \quad v_{\theta 2} = 0; \\ v_{z4} = v_n \cdot f(\theta); \quad v_{r4} = 0; \quad v_{\theta 4} = 0. \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь $f(\theta) = \frac{r_n^2 \cos^2 \theta}{A^2 - r_n^2 \cos^2 \theta}$; v_n – скорость пуансона; h_∂ – глубина распространения очага пластической деформации (рис.1, б).

Относительное удельное усилие деформации \bar{p} рассчитываем по известным методикам, описанным в работах [4, 5]

$$\bar{p} = \frac{1}{v_n \sigma_s \pi r_n^2} \cdot \sum_{i=1}^{11} N_i, \quad (2)$$

где N_i – мощности внутренних сил сопротивления деформации, контактного трения и сдвига, вычисленные для каждой из зон детали.

Соотношение (2) есть функция свойств деформируемого материала (σ_s), размеров заготовки и инструмента, показанных на рис.1, условий трения на контактных поверхностях матрицы и пуансона (μ_1 и μ_2), а также варьируемого параметра \bar{h}_∂ , который определяет глубину распространения очага пластической деформации. Подставив в выражение (2) значение вычисленных мощностей и преобразовав его к критериальному виду, находим

$$\bar{p} = a_0 + a_1 \bar{h}_\partial + a_2 \frac{1}{\bar{h}_\partial}, \quad (3)$$

где \bar{h}_∂ – безразмерный параметр, определяющий относительную глубину распространения очага пластической деформации: $\bar{h}_\partial = \frac{h_\partial}{A}$; a_0, a_1, a_2 – коэффициенты, которые однозначно определены из выражения (2).

Выражение (3) – это функция, которая представляет собой математическую модель процесса. Она объединяет силовые и кинематические характеристики процесса и позволяет провести анализ силового режима выдавливания и кинематики течения металла. Относительное удельное усилие деформации \bar{p} можно определить из зависимости (3), если известна глубина распространения очага пластической деформации \bar{h}_∂ . В соответствии с принципом минимума полной энергии деформации действительные значения \bar{h}_∂ должны минимизировать функцию (3). Это условие можно представить в виде дифференциального уравнения

$$d\bar{p}/d\bar{h}_\partial = 0, \quad (4)$$

из которого можно найти значение \bar{h}_∂ , минимизирующее функцию (3).

Таким образом, зная размеры детали ($A, d = 2r_n$), заготовки (h_3), а также механические характеристики материала заготовки (σ_s) и коэффициенты трения на матрице и пуансоне (μ_1 и μ_2), по соотношениям (3) и (4) можно найти относительную глубину распространения очага пластической деформации \bar{h}_∂ , относительное удельное деформации \bar{p} , построить поля скоростей для зон 1–4, а уже по этим данным рассчитать полное усилие деформации F_∂ , необходимое для выбора оборудования, и конечное формоизменение – высоту фестонов h_ϕ .

Решения, полученные с помощью предложенной расчетной схемы и математической модели процесса (3), представлены в виде графиков на рис.2, рис.3.

Так как деталь симметричная, на графиках (рис.2 и рис.3) представлены результаты расчета для $1/4$ детали, где угол θ изменяется от 0° до 90° .

Как видно из графиков, при принятой расчетной схеме относительная высота стенки детали $\bar{h}_c = \frac{h_c}{A}$ существенно зависит от угла θ , причем максимальная относительная высота стенки \bar{h}_{cmax} получается при θ равном 0° и 90° , что соответствует наименьшей толщине стенки коробки, а минимальная высота – \bar{h}_{cmin} – при $\theta = 45^\circ$, т.е. в углах детали (рис.2).

Как видно из рис.3, высота фестона $h_\phi = h_c^{max} - h_c^{min}$ (здесь уже берем не относительные высоты стенки, а натуральные, см. рис.1, б) зависит от относительной толщины стенки и не зависит от высоты выдавленной детали.

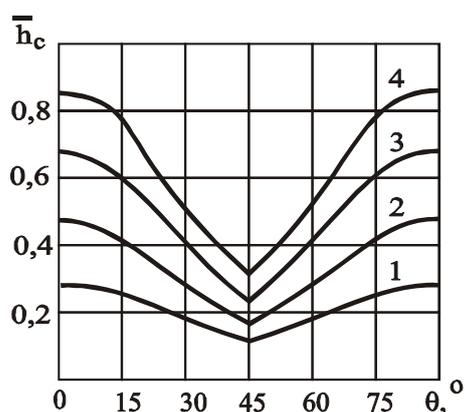


Рис.2. Графики зависимости относительной высоты стенки h_c от угла θ при разных относительных радиусах пуансона r_n : 1 – 0,4; 2 – 0,5; 3 – 0,6; 4 – 0,7; 5 – 0,8. $\Delta h/h_3 = 0,9$.

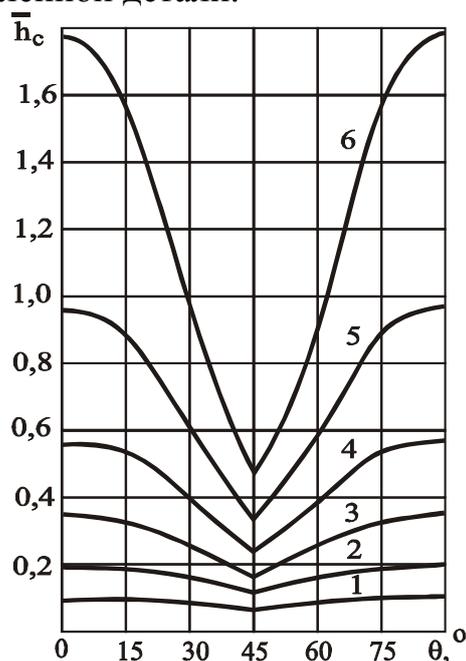


Рис.3. Графики зависимости относительной высоты стенки h_c от угла θ при разных значениях относительного хода пуансона $\Delta h / h_3$: 1 – 0,1; 2 – 0,3; 3 – 0,5; 4 – 0,7. $r_n/A = 0,7$.

Как показал эксперимент, в процессе выдавливания соотношение h_c^{max} / h_c^{min} – величина постоянная. Это свидетельствует о том, что радиальная схема течения металла характерна только для начальной стадии выдавливания, когда стенка невысокая, и мощность сдвига при образовании фестонов оказывается небольшой. Когда

же сформировалась стенка определенной высоты, то энергетически более выгодным оказывается вихревое движение.

Таким образом, теоретические расчеты и результаты, полученные экспериментально, свидетельствуют о том, что при выдавливании высоких деталей типа коробок с цилиндрическим отверстием процесс протекает в две стадии: на первой формируются фестоны высотой h_{ϕ} , которую можно определить по приведенной методике; вторая стадия характеризуется условием $v_z = const$, которое показывает, что при дальнейшей деформации фестоны не подрастают. Такие условия формоизменения свидетельствуют о том, что на первой стадии имеет место радиальное течение металла, а на второй – вихревое.

Анализ заключительной стадии, при которой сформировавшаяся стенка высотой h_c влияет как жесткий конец и выравнивает по углу θ скорость v_z , выполняется по схеме, представленной на рис.4, а: зоны 1, 2, 3 – пластичные; 4, 5 – жесткие. Так как на этой стадии размеры сформированного фестона уже не изменяются, а толщина стенки по θ переменна, то это приводит к формированию вихревого течения, при котором в зонах 2 и 3 имеем $v_{\theta} \neq 0$ (рис. 4, б).

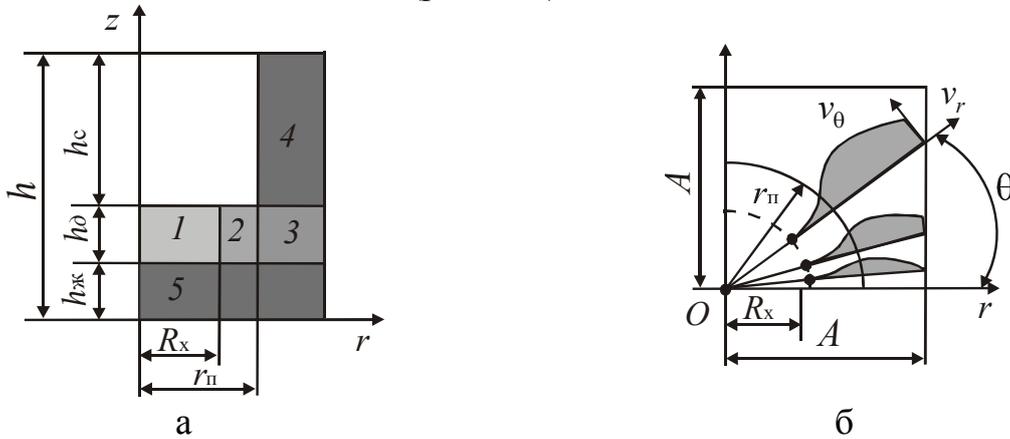


Рис. 4. Схема разбивки детали на зоны (а) и схема вихревого течения в зонах 2 и 3 (б).

В данной статье для теоретического анализа использован энергетический метод в его классической вариационной постановке.

Для вихревого течения, т.е. течения, при котором все три компоненты скоростей v_r , v_{θ} и v_z отличны от нуля, условие постоянства объема имеет вид:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial v_{\theta}}{\partial \theta} + v_r \right) = 0.$$

Это дифференциальное уравнение содержит три неизвестные функции v_r , v_{θ} и v_z . Поэтому, если задать две функции v_{θ} и v_z , то можно определить и функцию v_r из условия постоянства объема.

Для этого можно использовать такие подходящие функции, описывающие течение металла в зонах 1, 2 и 3 (зоны 4 и 5 – жесткие, поэтому в них все компоненты скоростей равны нулю), удовлетворяющие граничным условиям.

Для области 1 ($0 < r < R_x$) характерно чисто радиальное течение металла, которое описывается функциями, линейными относительно независимых переменных r и z :

$$v_{z1} = -\frac{v_n}{h_\delta} [z - (h - h_\delta)]; \quad v_{r1} = \frac{v_n}{2h_\delta} \cdot r; \quad v_{\theta 1} = 0. \quad (5)$$

Для областей 2 и 3 ($R_x < r < r_n$, а также $R_x < r < A/\cos\theta$) характерно вихревое течение, которое описывается сложными подходящими функциями:

$$v_{z2} = -\frac{v_n}{h_\delta} [z - (h - h_\delta)]; \quad v_{\theta 2} = [a_0 + a_1 r + a_2 r^2 + a_3 r^3] (\sin 4\theta + \lambda \sin 8\theta) \cdot v_n;$$

$$v_{z3} = \frac{v_n}{h_\delta} [z - (h - h_\delta)] \frac{\pi r_n^2}{4A^2 - \pi r_n^2}; \quad v_{\theta 3} = v_{\theta 2}, \quad (6)$$

где r, θ и z – независимые переменные; h_δ – параметр оптимизации; a_0, a_1, a_2, a_3 и λ – варьируемые параметры.

На основании предварительных экспериментальных исследований и теоретического анализа установлено, что $0 < \lambda < 0,5$.

Функции v_{r2} и v_{r3} для областей 2 и 3 можно найти из условия несжимаемости

$$v_{r2} = -\frac{1}{r} \left[\int \left(\frac{\partial v_{z2}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \right) r dr + C_2 \right]; \quad v_{r3} = -\frac{1}{r} \left[\int \left(\frac{\partial v_{z3}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \right) r dr + C_3 \right]$$

Интегрирование приводит к получению весьма сложных выражений такого вида

$$v_{r2} = f_{r2}(a_0, a_1, a_2, a_3, \lambda, R_x, h_\delta, r, \theta);$$

$$v_{r3} = f_{r3}(a_0, a_1, a_2, a_3, \lambda, R_x, h_\delta, r, \theta). \quad (7)$$

Здесь R_x – независимая переменная, позволяющая определить границу областей 1 и 2. Исходя из граничных условий, можем установить, что, $0 \leq R_x \leq r_n$.

Для описания функций v_θ (6) и v_r (7) в работе использовано пять варьируемых параметров. Это очень усложняет их анализ и затрудняет определение численных значений всех параметров. Однако функции скоростей v_θ и v_r обладают следующими свойствами:

- 1) очевидно, что вихревое течение начинается с некоторой координаты $r=R_x$;
- 2) также очевидно, что в точке $r=R_x$ функция v_θ гладкая;
- 3) металл заготовки не проникает через стенку матрицы.

Из этих свойств получаем дополнительные важные условия: 1) при $r=R_x$ $v_\theta = 0$; 2) при $r=R_x$ имеем $dv_\theta/dr=0$, а также $d^2v_\theta/dr^2=0$; 3) при $r=A/\cos(\theta)$ $v_{r3}/v_{\theta 3} = \text{tg}(\theta)$.

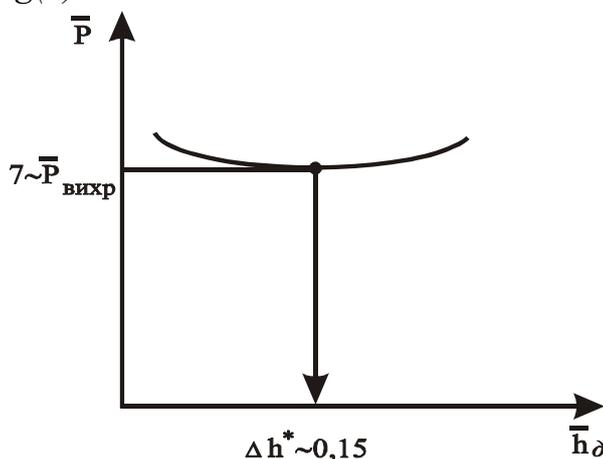


Рис.5. График зависимости относительно-

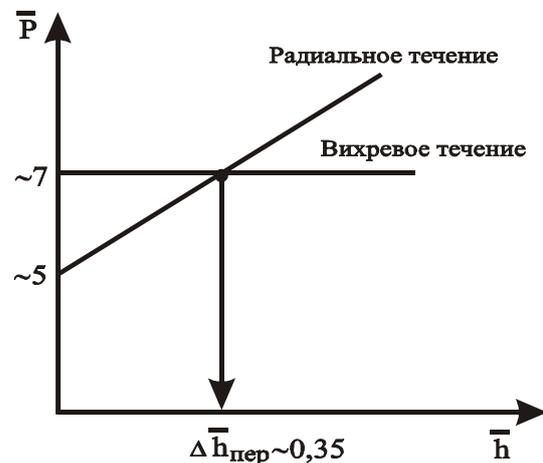


Рис. 6. Схема перехода от радиального к

го удельного усилия деформации от относительной глубины распространения очага деформации.

вихревому течению в процессе выдавливания детали с переменной по периметру толщиной стенки.

Эти свойства позволяют сократить количество варьируемых параметров a_0, a_1, a_2, a_3 , связав их через параметры $M1$ и $T2$, что значительно упрощает процесс минимизации функции \bar{p} (2) в зависимости от глубины распространения очага пластической деформации (рис. 5), а также проследить переход процесса деформации от начальной стадии (чисто радиального течения) к заключительной стадии – вихревому течению, как энергетически более выгодному (рис. 6).

Выводы. 1. Известные из литературы методы анализа процессов течения металла при выдавливании деталей с переменной по периметру толщиной стенки характеризуются значительными упрощениями, которые не позволяют проанализировать поля скоростей и получить адекватные решения по формоизменению деталей. 2. Выдавливание деталей с переменной по периметру толщиной стенки характеризуется сложным вихревым течением металла. На примере выдавливания квадратной детали с цилиндрическим отверстием показана возможность использования метода теоретического анализа процесса деформации при явно выраженном неосесимметричном течении металла. Авторы назвали такое течение вихревым, хотя и понимают некоторую условность такого термина. 3. Теоретический анализ процесса выдавливания при наличии нескольких варьируемых параметров представляет значительные трудности, поэтому его можно выполнить только на персональной ЭВМ с большой памятью и высоким быстродействием. Если ранее такие машины были редкостью, то сегодня мы можем выполнять все расчеты на ПЭВМ, используя пакеты программ типа MathCAD. 4. Теоретический анализ процесса выдавливания по предложенной методике позволяет с достаточной точностью определить не только поле скоростей процесса в областях деформации 1, 2, 3, но и получить усилие деформации при различных геометрических параметрах (A, r_n и др.). 5. Проведенный теоретический анализ позволил определить границу перехода течения металла от чисто радиального (область 1) к области вихревого течения (области 2 и 3). 6. Как показали расчеты, координата R_x , при минимизации функции \bar{p} (2), стремится к нулю. Это позволяет сделать вывод о том, что при выдавливании данной детали радиальное течение имеет место на начальном этапе формирования очага деформации, а затем процесс деформации протекает как вихревой. 7. Теоретический анализ процесса выдавливания данной детали подтверждает и обосновывает результаты эксперимента по характеру течения металла, позволяет прогнозировать высоту фестонов. 8. Предложенный метод теоретического анализа можно успешно использовать для анализа процессов деформации весьма сложных деталей, в которых течение металла характеризуется вихревым течением.

Литература: 1. Берлин Б.М., Соленов В.М., Целяев В.Г. Некоторые особенности изготовления полых фланцевых поковок на высокоскоростном молоте // Кузнечно-штамповочное производство, 1972. – N 10. – С.6 – 8. 2. Семенов И.Е. Расчет усилия деформирования при обратном выдавливании изделий коробчатой формы // Труды МВТУ, N 263. Машины и технология обработки металлов давлением. – М., Машиностроение, 1978. – С.130 – 132. 3. Куликов И.В. Силовой режим выдавливания деталей коробчатой формы // Вестн. Харьк. политехн. ин-та, 1985. – N 225. Прогрессивная технология обраб. металлов, вып.6. – С.68 – 70. 4. Теория обработки металлов давлением / Под ред. И.Я.Тарновского – М.: Металлургия, 1963. – 672 с. 5. Евстратов В.А. Теория обработки металлов давлением. – Харьков: Вища школа, 1981. – 248 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННО УПРОЧНЕННОГО КОРЫТНОГО ПРОФИЛЯ 80x60x32x2,5 мм

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

The outcomes of experimental researches of power and force parameters of process of hardening by a strain of the bent profiles by special elements, - Experimental researches of power and force parameters are presented during formation of the form of hardening by a strain of a profile 80x60x32x2,5mm, having cross cut by the way trough.

Экспериментальные исследования энергосиловых параметров формообразования деформационно упрочненного корытного профиля 80x60x32x2,5 мм (рис. 1) проводились в процессе их изготовления на профилегибочном агрегате (ПГА) 1...4x50...300.

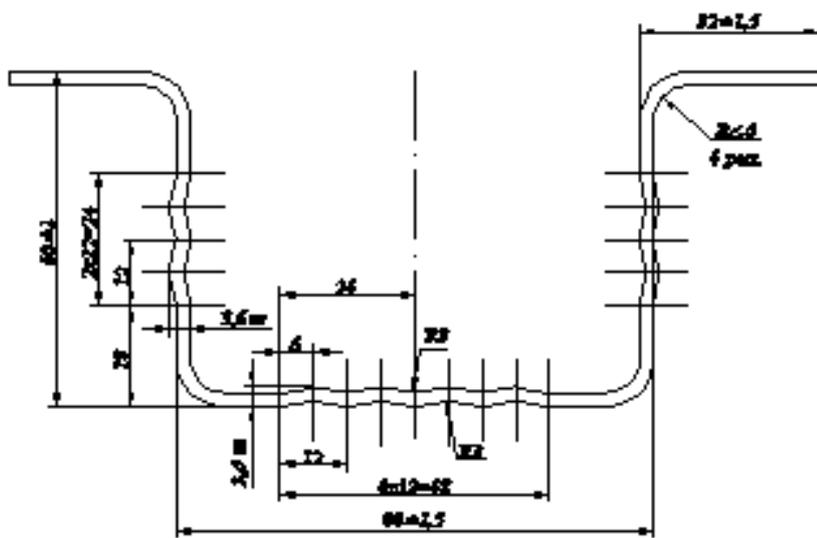


Рис. 1. Корытный профиль 80x60x32x2,5 мм.

Цель проведения исследований - определение возможности организации наиболее энергоемкого процесса формовки рифлений на заготовке при ее упрочнении в клетях действующих промышленных ПГА, а также совмещения этого процесса с подгибкой элементов профиля в пределах одной рабочей клетки.

При экспериментальных исследованиях использовался метод электротен-

зометрии [1]. Для определения усилий в валках применялись месдозы пластинчатого типа. Крутящие моменты на шпинделях рабочей клетки определялись с помощью наклеенных на их поверхности проволочных тензодатчиков. Градуировочные графики месдоз и шпинделей агрегата приведены на рис. 2 и 3.

Измерения производились с использованием тензометрической станции «Топаз-1» и шлейфового осциллографа Н-700. Погрешность измерения регистрирующей аппаратуры, а также погрешность, вызванная ползучестью датчиков, составляет $\pm 8\%$.

Для определения энергосиловых параметров процесса формовки рифлений, измерялись усилия в валках и крутящие моменты на шпинделях привода верхнего и нижнего валков третьей клетки ПГА, а также крутящий момент на шпинделе привода нижнего валка первой клетки с отключенным приводом верхнего валка. Для определения возможности совмещения в одной клетке операций формовки рифлений и подгибки элементов профиля измерялись усилия в валках пятой клетки агрегата, где производилась подгибка элементов профиля на угол 14° .

Результаты замеров усилия в валках и крутящих моментов составили:

- усилие на опорах валков третьей клетки со стороны обслуживания – 59,93 кН;

- усилие на опорах валков третьей клетки со стороны привода – 60,86 кН;
- суммарные усилие в валках третьей клетки – 120,79 кН;
- крутящий момент на шпинделе привода верхнего валка третьей клетки – 1,966 кНм;
- крутящий момент на шпинделе привода нижнего валка третьей клетки – 1,425 кНм;
- крутящий момент на шпинделе привода нижнего валка первой клетки – 1,724 кНм;
- усилия на опорах валков пятой клетки со стороны обслуживания – 25,00 кН;
- усилия на опорах валков пятой клетки со стороны привода – 26,65 кН;
- суммарные усилие в валках пятой клетки – 51,65 кН.

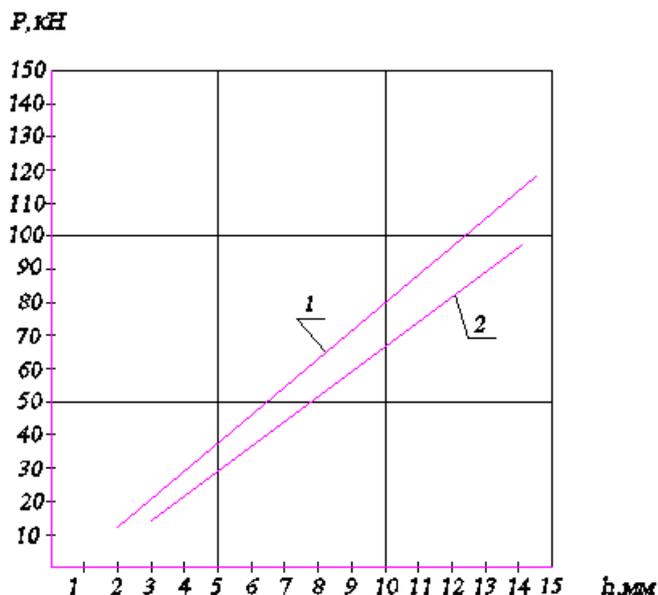


Рис. 2. Градуировочные графики ме-сдоз (1- со стороны обслуживания ПГА; 2- со стороны привода ПГА).

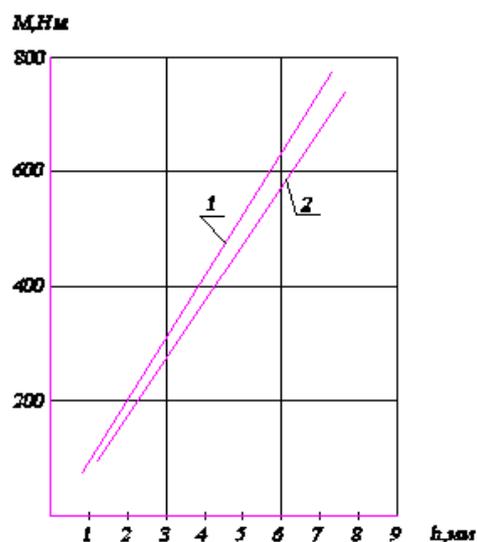


Рис. 3. Градуировочные графики шпинделей (1-верхнего валка; 2- нижнего валка).

Исследования энергосиловых параметров формообразования деформационно упрочненного корытного профиля 80x60x32x2,5 мм показали, что он может быть освоен в промышленности на ПГА типа 1...4x50...300. Допустимые усилия в валках, в соответствии с техническими характеристиками этих ПГА, составляют 147 кН, крутящие моменты – 2,35 кНм. В пределах одной клетки может производиться формовка не более 4-х рифлений (усилие в валках - 120,79 кН). Совмещение в одной клетки операций формовки рифлений и подгибки элементов профиля недопустимо, так как суммарные усилия в валках превысят допустимые.

Выводы. Экспериментальными исследованиями установлено, что для валковой формовки группы элементов усиления (4-х рифлений) необходимо суммарное усилие 120,79 кН, крутящие моменты на шпинделях привода верхнего и нижнего валков - 1,966 и 1,425 кНм. Для подгибки элементов профиля на угол 14° необходимо суммарное усилие 51,65 кН. Полученные результаты доказывают возможность организации в промышленных условиях процесса деформационного упрочнения рифлениями в валках гнутых профилей толщиной до 2,5 мм на ПГА типа 1...4x50...300 при формовке в одной клетки не более 4-х рифлений без совмещения этой операции с подгибкой элементов профиля.

Литература: 1. Чиченев Н.А., Кудрин А.Б., Полухин П.И. Методы исследования процессов обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1977. – 312 с.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТЕРМООБРОБЛЕНИХ ЛЕГОВАНИХ
ЛАТУНЕЙ ТА БРОНЗ

Браташевський О.Ю., канд. техн. наук, **Полякова А.Г.**, **Горбачова Л.В.**,
Польотов В.А., **Каплуновський В.О.** (м. Харків, Україна)

It was suggested wear alloy brasses and bronzes after the heat treatments.

Латуні і бронзи мають достатньо широке використання при виготовленні таких деталей машин і механізмів, які працюють в умовах не тільки високих напружень, але й при наявності тертя з суттєвим розігрівом поверхонь, що контактують між собою [1]. До них належать напрямні втулки, сідла клапанів двигуна та ін. Також латуні і бронзи застосовуються для підшипників ковзання. Отже, латуні і бронзи, які призначені для виготовлення вказаних деталей, повинні мати високу зносостійкість не тільки при кімнатній температурі, але й при температурах вищих за кімнатну.

Для правильного вибору латуней та бронз при виготовленні вказаних деталей слід зважати на залежність зносостійкості цих сплавів не тільки від їх складу, але й від режимів кінцевої термічної обробки, зокрема старіння.

Якщо не враховувати залежність зносостійкості (антифрикційності) латуней та бронз від режимів старіння, то це може призвести до структурних змін в сплаві при роботі і, як слідство, до виходу з ладу вузла механізму.

Так [2], наприклад, при експлуатації двигунів внутрішнього згорання трапляються випадки неправильного вибору режимів термічної обробки напрямної втулки, виготовленої з берилієвої бронзи, в якій обертається вал приводу розподільника запалювання, в результаті чого відбуваються структурні зміни за рахунок його розігрівання в процесі роботи втулки, яка змінює свої розміри, заклинює вал розподільника, що виводить з ладу весь двигун.

На сьогодні даних щодо впливу режимів термічної обробки латуней і бронз на їх зносостійкість в узагальненому вигляді не існує. Тому метою даного дослідження стало визначення впливу режимів старіння, а також наявності пластичної деформації перед старінням на зносостійкість поширених латуней і бронз.

Матеріалом дослідження були леговані латуні марок ЛАН 59-3-2; ЛАЖ 60-4-1; ЛАЖ 60-1-1,5 та ЛМЦА 57-3-1, а також леговані бронзи марок БрО 10; БрАЖН 10-4-4; БрБ2 і БрС30. З цих сплавів вирізали зразки діаметром 15мм і довжиною 25мм. Зразки піддавалися відпаленню для одержання рівноважної структури. Відпалені зразки гартували у воді від температур: латуні і БрБ2 від 860°C, БрО 10 від 700°C, БрАЖН 10-4-4 від 980°C.

Після гартування латуні ЛАН 59-3-2 і ЛАЖ 60-4-1 стискували на пресі зі ступенем деформації 70%. Після цього всі зразки піддавали старінню: латуні при 200, 300, 400°C впродовж 2 годин, а бронзи при 200, 300, 400, 500°C з витримкою 2,3 і 5 годин. У всіх зразків вимірювали міцність (σ_B), пластичність (δ) і зносостійкість як до гартування+старіння, так і після них. Бронзу БрС30 вибрано з метою оцінки рівня антифрикційних властивостей перелічених сплавів шляхом порівняння даних зносостійкості. Результати досліджень наведено в табл. 1-3.

Аналіз одержаних даних показує суттєвий вплив на зносостійкість легованих латуней і бронз їх складу, видів та режимів термічної обробки. Так (див. табл. 1), наявність в латунях алюмінію позитивно впливає на їх зносостійкість. Рівень зносостійкості алюмінієвих латуней після відпалювання (60-100 хв/г) досягає рівня зносостійкості середньовуглецевих загартованих сталей (до 0,45%С”).

Таблиця 1

Міцність (σ), пластичність (δ) і зносостійкість легованих латуней та бронз в залежності від термічної обробки і пластичної деформації

Марки латуней та бронз	Вид обробки								
	Відпалювання			Гартування+старіння			Гартування +наклеп +старіння		
	σ_B , Мпа	δ , %	Зносостійкість, хв·г	σ_B , Мпа	δ , %	Зносостійкість, хв·г	σ_B , Мпа	δ , %	Зносостійкість, хв·г
ЛАН 59-3-2	500	42	70	650	12	110	820	24	140
ЛАЖ 60-40-1	600	45	100	700	15	130	980	30	160
ЛАЖ 60-1-1,5	450	45	60	550	20	80			
ЛмцА 57-3-1	550	30	80	680	18	5120			
БрО 10	250	5	30	500	5	80			
БрЖАН 10-4-4	650	40	110	1400	5	185			
БрБ2	500	30	80	1200	4	170			
БрС30	60	4	14	-	-	-			

Таблиця 2

Зносостійкість легованих латуней в залежності від температури старіння

Марка латуні	Зносостійкість (хв./г) після старіння при температурах (°C)		
	200	300	400
ЛАН 59-3-2	70	110	100
ЛАЖ 60-4-1	110	130	125
ЛАЖ 60-1-1,5	60	80	70
ЛМцА 57-3-1	90	120	100

Таблиця 3

Зносостійкість легованих бронз в залежності від температури та витримки при

Марка латуні	Зносостійкість (хв./г) після старіння при температурах (°C) і витримки (год)							
	200			300			400	
	2	3	4	2	3	5	2	3
БрО 10	50	70	80	80	80	78	65	65
БрАЖН 10-4-4	110	160	180	160	170	180	185	185
БрБ2	100	140	160	170	170	170	155	155

Гартування та старіння алюмінієвих латуней збільшує їх зносостійкість приблизно на 30%, що досягає рівня загартованих сталей з вмістом вуглецю до 0,65%. Але цей рівень зносостійкості алюмінієвих латуней можна ще збільшити приблизно на 25% (до 140-160 хв./г), якщо після їх гартування і до старіння провести пластичну деформацію (наклеп). Такий наклеп (ступінь деформації 70%) сприяє зростанню зносостійкості відпаленої алюмінієвої латуні майже в два рази. Тобто, така обробка алюмінієвих латуней, як гартування+пластична деформація (на 70%)+старіння, забезпечує одержання зносостійкості латуней на рівні зносостійкості загартованих вуглецевих сталей з вмістом вуглецю, близьким до евтектоїдних (наближеного до 0,8%). При цьому, суттєве значення має, в першу чергу, концентрація в латунях алюмінію, а також інших легуючих елементів. Збільшення кількості алюмінію від 1

до 40% (від ЛАЖ 60-1-1,5 до ЛАЖ 60-4-1) призведе до росту зносостійкості з 60 хв./г 100 хв./г у відпаленому стані, тобто майже у два рази. Після термічної обробки (гартування+старіння) ця різниця в рівні зносостійкості латуні зберігається: зносостійкість латуней ЛАЖ 60-1-1,5 і ЛАЖ 60-4-1, відповідно, становить 80 хв./г та 130 хв./г. Слід також зазначити, що марганець може компенсувати недостатню кількість алюмінію щодо зносостійкості латуней. Так, 3% марганцю і 1% алюмінію (ЛМЦА 57-3-1) забезпечують зносостійкість в 1,3 рази вищу за зносостійкість латуні з 1% алюмінію і без марганцю (ЛАЖ 60-1-1,5): відповідно, 80хв./г та 60хв./г. В разі термічної обробки (гартування+старіння) ця різниця в зносостійкості даних латуней збільшується і досягає 1,75 рази (термооброблені ЛМЦЛ 57-3-1 і ЛАЖ 60-1-1,5 мають зносостійкість, відповідно, 120хв./г та 80хв./г). Зносостійкість латуні ЛМЦА 57-3-1 після термічної обробки (гартування+старіння) також майже досягає рівня зносостійкості термообробленої латуні ЛАЖ 60-4-1 (відповідно, 120хв./г), тобто різниця в 3% алюмінію між даними латунями майже повністю компенсується трьома відсотками марганцю щодо їх зносостійкості. Такий вплив марганцю на зносостійкість латуні, безумовно, підкріплюється і чотирма відсотками цинку, на які відрізняється склад ЛМЦА 57-3-1 від складу ЛАЖ 60-4-1. якщо ж врахувати коефіцієнти Л. Гійє, які встановлюють ступінь впливу легуючих елементів в порівнянні з цинком на структуру латуні, то латунь ЛМЦА 57-3-1 слід розглядати як латунь з 41,5% цинку, а латунь ЛАЖ 60-4-1 - як латунь з 60% цинку (величини даних коефіцієнтів для алюмінію - 5; заліза - 1 і марганцю - 0,5). Тобто, латунь ЛМЦЛ 57-3-1 має структуру $\alpha+\beta$, а латунь ЛАЖ 60-4-1 - крихку γ -фазу. В той же час значення зносостійкості і наявність суттєвої пластичності цих латуней свідчить, що коефіцієнт Л. Гійє відносно алюмінію зменшується із зростанням кількості алюмінію. Отже, слід вважати, що дані латуні мають $\alpha+\beta$ структуру, а термічна обробка цієї структури майже однакова.

Олов'яна бронза БрО 10 (див. табл. 1) має зносостійкість значно нижчу за зносостійкість алюмінієвих латуней після їх відпалювання (відповідно, 30 хв/г проти 60-100 хв/г). Після гартування і старіння БрО 10 зносостійкість її зростає майже у 3 рази і наближується до рівня зносостійкості термооброблених алюмінієвих латуней (відповідно, 80 хв/г проти 80-130 хв/г).

Алюмінієва бронза БрАЖН 10-4-4 (див. табл. 1) має найбільшу зносостійкість по відношенню до всіх латуней і бронз, що досліджувалися, як після відпалювання, так і після гартування та старіння - відповідно, 110 хв/г і 185 хв/г. Після термообробки зносостійкість цієї бронзи досягає рівня зносостійкості загартованої високовуглецевої евтектоїдної сталі.

Берилієва бронза БрБ2 (див. табл. 1) має зносостійкість у відпаленому стані невисокого рівня (80 хв/г), але після гартування і старіння значно збільшує зносостійкість - більш ніж у 2 рази (170 хв/г). Ця бронза виявляє високу чутливість до зміцнювальної термічної обробки (гартування+старіння). Після гартування і старіння зносостійкість берилієвої бронзи досягає рівня зносостійкості БрАЖН 10-4-4, який вище за рівень зносостійкості всіх легованих латуней, що досліджувалися, навіть якщо ці латуні при термічній обробці додатково піддавали пластичній деформації, котра збільшувала рівень їх зносостійкості.

Таким чином, найбільшу зносостійкість мають алюмінієва і берилієва бронзи в термообробленому стані (гартування+старіння) - відповідно, 185-170 хв/г. Меншу зносостійкість мають алюмінієво-марганцеві латуні після гартуван-

ня+наклеп+старіння - 149-160 хв/г. Ще нижчий рівень зносостійкості (80-130 хв/г) показують олов'яна бронза та алюмінієво-марганцеві латуні після гартування і старіння. Отже, олов'яні, алюмінієві і берилієві бронзи слід використовувати в термообробленому стані (гартування+старіння), а алюмінієві та марганцеві слід використовувати зі складом, що має: до 3-4% алюмінію або марганцю, і після термомеханічної обробки (гартування+наклеп+старіння).

На підставі даних табл. 1 можна якісно порівняти такі властивості бронз, як антифрикційність і зносостійкість: найкращими антифрикційними матеріалами серед мідних сплавів є олов'яні та свинцеві бронзи; до їх числа можна додати і БрЛЖНІ 10-4-4. антифрикційність цих бронз знаходиться приблизно на одному рівні при рівних умовах роботи (площині контакту, швидкостях, напруженнях та ін.). В той же час, як видно з даних табл. 1, рівень зносостійкості цих бронз суттєво різниться. Зносостійкість бронзи БрО 10 в декілька разів нижча за зносостійкість бронзи БрАЖН 10-4-4, як після відпалювання, так і після гартування і старіння (30 хв/г проти 110 хв/г та, відповідно, 80 хв/г проти 180 хв/г). Що стосується свинцевої бронзи БрС 30, то її зносостійкість набагато нижча за зносостійкість всіх інших бронз і, навіть, латуней, які є гіршими за неї антифрикційними матеріалами. Зносостійкість БрС 30 у два рази менша за зносостійкість БрО 10 (відповідно, 14 хв/г та 30 хв/г), хоча ці бронзи мають однаковий рівень антифрикційності. Це можна було б пояснити тим, що БрО 10 і БрС 30 відносяться до різних класів антифрикційних матеріалів: перша - до матеріалів з м'якою матрицею і твердими включеннями, а друга - до матеріалів з твердою матрицею і м'якими включеннями; але їх низька зносостійкість відносно зносостійкості таких, гірших за них, антифрикційних матеріалів, як латуні, свідчить, що антифрикційність та зносостійкість зовсім не корелюють між собою. Тому, оцінювати рівень однієї з цих властивостей на підставі рівня іншої неможливо.

Дані табл. 2 показують, що оптимальна температура старіння легованих латуней, що досліджувалися, становить 300°C. Після цієї температури відбувається стабілізація найбільшого рівня зносостійкості латуней, що позитивно впливає на працездатність цих латуней в умовах тертя і підвищених температур.

Старіння бронз, які досліджувалися, слід використовувати при таких температурах: БрО 10 і БрБ2 - при 300°C; БрАЖН 10-4-4 - при 400-500°C (див. табл. 3). Оптимальна витримка при температурах старіння становить 2-3 години.

Висновки. 1. Алюмінієві латуні після гартування від 800°C у воді та старіння при 300°C впродовж двох годин мають високий рівень зносостійкості, який досягає рівня зносостійкості загартованих середньовуглецевих сталей. Збільшення рівня зносостійкості цих латуней на 25% можливо в разі застосування після гартування. 2. Зносостійкість алюмінієвої та берилієвої бронз після їх гартування (БрАЖН 10-4-4 від 980°C у воді, БрБ2 - від 800°C у воді) та старіння (при температурах, відповідно, 400 і 300°C впродовж 2-3 годин) досягає рівня зносостійкості. 3. Найбільше зростання рівня зносостійкості (майже у три рази) при застосуванні термічної обробки (гартування від 700°C у воді і старіння при 300°C впродовж 2-3 годин) зафіксовано у олов'яній бронзі БрО 10.

Література: 1. Лахтин Ю.М., Леонтьев В.П. Материаловедение: Учебник для машиностроительных ВУЗов. – 3-е изд. перераб. и доп. - М.: Машиностроение. 1990. - 493 с, ил. 2. Дудко П.Д., Браташевський О.Ю., Крюк А.Г., Полякова А.Г. Конспект лекцій з курсу "Технологія заготовчого виробництва" для студентів спеціальностей 07.01 та 07.16 усіх форм навчання. - Харків: ХІЕІ, 1993 -88с.

ПРОГРЕСИВНА ТЕХНОЛОГІЯ ТЕРМООБРОБКИ НОЖІВ БУЛЬДОЗЕРІВ

Браташевський О.Ю., канд. техн. наук, **Полякова А.Г.**, **Горбачова Л.В.**,

Польотов В.А., **Каплуновський В.О.** (м. Харків, Україна)

It was suggested progressive technology head treatment for cutting elements of deggers

Працездатність робочих органів землерийних машин визначається, по-перше, їх стійкістю проти поломок, яка забезпечується необхідним рівнем механічних властивостей сталі, і, по-друге, їх зносостійкістю.

За кордоном передові фірми промислово-розвинених країн, такі як фірма "Катерпіллар" (США), фірма "Комацу" (Японія), фірма "Інтертрак" (Германія) та інші, робочі органи землерийних машин виготовляють з якісних легованих сталей із застосуванням термічної обробки. Виходячи з аналізу мікроструктури сталі та фізико-механічних властивостей кращих вітчизняних і зарубіжних різальних елементів землерийних машин, встановлено [1], що найвищу працездатність мають різальні елементи фірми "Катерпіллар" (США). Ці різальні елементи піддаються об'ємній термічній обробці - гартуванню з відпусканням ($HRC = 40-46$).

Слід відзначити, що до складу сталі зарубіжних різальних елементів входить молібден, що дорого коштує, який покращує фізико-механічні властивості сталі, включаючи зносостійкість, але й водночас підвищує вартість сталі. Вітчизняні різальні елементи виготовляють зі сталей марок 5; 45 і 65Г з наступною термічною обробкою, а також зі сталей 35; 15ХСНД; Г13 з подальшим наплавленням різальної частини тврдосплавними матеріалами, від яких і залежить в основному стійкість сталей.

Однак цим сталям не вдається підвищити стійкість до рівня зарубіжних. В цьому плані найбільш раціональним способом підвищення зносостійкості є поєднання легування сталі з її термічною обробкою, яку можна поділяти на поверхневу та об'ємну. Згідно з даними ряду дослідників [2], термообробка з використанням СВЧ передньої грані різального елемента також, як і наплавка, не є достатньо ефективним способом підвищення зносостійкості внаслідок інтенсивного зношування не зміцненої задньої грані різального елемента та низького опору крихкому руйнуванню його передньої частини.

Більш ефективним способом підвищення експлуатаційної стійкості різальних елементів є зміцнення об'ємне або з нагріву СВЧ по контуру елемента, при цьому переважає об'ємне зміцнення з використанням ізотермічного гартування [3].

В роботі японських дослідників [4] було показано, що при експлуатації різальні елементи землерийних машин піддаються локальному розігріванню, причому температура цього розігрівання залежить від умов роботи, а в кінцевому випадку - від характеру ґрунту. Так, для дуже важких умов роботи (тяговий клас землерийних машин 25т, ґрунт скельний) локальне розігрівання різальних елементів може сягати $540-560^{\circ}\text{C}$, що призводить до значного і різкого збільшення зносу різального елемента. Для запобігання такому явищу автори пропонують в процесі термообробки виконувати відпускання при температурах $500-550^{\circ}\text{C}$. Така термообробка дозволила авторам значно зменшити зношування різальних елементів.

Термічна обробка різальних елементів землерийних машин повинна бути спрямована на отримання в сталі метастабільної фази (наприклад, пересичений α -

твердий розчин) з рівномірним розподілом в ній дисперсних карбідних включень. При цьому, кінцевою операцією термічної обробки повинно бути відпускання сталі при температурах, які відповідають температурам розігрівання різального елемента під час його роботи.

Термооброблена сталь з такою структурою має найбільшу зносостійкість. В зв'язку з цим, в плані підвищення зносостійкості сприятливою є мартенситна структура після відпускання сталі при 200-300°C, а також бейнітна структура, отримана в результаті ізотермічного гартування сталі. При цьому слід відзначити, що у випадку відпускання загартованої сталі при температурах, нижчих за 200°C, зношування сталі відбувається в крихкій області руйнування, а після відпускання при температурах вищих, за 200°C, - у в'язкій області.

Для забезпечення працездатності різальних елементів землерийних машин при низьких температурах структура сталі повинна бути дрібнозернистою, аби вона мала достатню ударну в'язкість.

Таким чином, метою даної роботи стало - підвищення стійкості різальних елементів землерийних машин шляхом підбору хімічного складу сталі певної якості і розробки технології термічної обробки, яка б забезпечила отримання в цій сталі дрібнозернистої метастабільної структури дисперсними карбідними включеннями та необхідний рівень механічних властивостей.

У даній роботі за матеріал дослідження було взято сталь 36Г2С із зносостійкою домішкою бору. За допомогою методу пробних гартувань у досліджуваній сталі визначали температури критичних точок. На підставі температур A_{c1} та A_{c3} вибирали температуру нагрівання 840-850°C.

Таблиця

Результати випробувань сталей на абразивну зносостійкість

Марка сталі; фірма; країна виробник	Стан сталі	Твердість <i>HV</i>	Зносостій- кість, хв/мм ³
Кремніемарганцева сталь з вмістом вуглецю до 0,2% (дослідна)	Гартування від 900°C+відпускання 200°C	373	7,9
Кремніемарганцева сталь з вмістом вуглецю до 0,3% (дослідна)	Гартування від 900°C+відпускання 200°C	374	3,3
Кремніемарганцева сталь з вмістом вуглецю до 0,4% (дослідна)	Гартування від 840°C+відпускання 200°C	627	18,8
Сталь 30ХГ2, фірма "Інтертрак", Німеччина	Термооброблена	280	4,7
Сталь 36Г2, фірма "Інтертрак", Німеччина	Термооброблена	218	6,0
Сталь 33ХС2, фірма "Комацу", Японія	Термооброблена	367	5,0
Сталь 33ХС2М, фірма "Комацу", Японія	Термооброблена	321	11,5
Сталь 28Г, фірма "Катерпіллар", США	Термооброблена	504	6,8
Сталь 37ГМ, фірма "Катерпіллар", США	Термооброблена	380	13,4

Для вибору режимів відпускання визначили залежності твердості та зносостійкості від температури нагрівання сталі в субкритичному інтервалі. Випробування сталі на знос в лабораторних умовах (в умовах тільки абразивного зносу) показали, що при абразивному зносі критерієм зносостійкості є твердість матеріалу; залежність зносостійкості та твердості сталі від температури відпускання має однаковий характер. Однак таке ствердження не може бути застосовано у випадку, коли поряд з абразивним зносом має місце інший вид зносу. Так, при підвищенні температури відпускання від 200 до 500 °С твердість сталі знижується монотонно, а знос спочатку практично не змінюється (в інтервалі 200-300 °С), а потім спостерігається різке його збільшення (в інтервалі 300-400 °С), яке суттєво сповільнюється в інтервалі 400-500 °С.

Крім цього, в процесі проведення стендових випробувань на зношування було досліджено можливість збільшення зносостійкості шляхом структурних змін в сталі при збереженні її твердості, оскільки вплив твердості на зносостійкість певного матеріалу і в певних умовах є однозначним — зниження твердості в кінцевому випадку призводить до збільшення зносу. З цією метою сталі, які відпустили при 200°С, піддавали додатковому відпусканню при 300, 400 і 500°С. Додаткове відпускання призвело до більш однорідного розподілу карбідів у структурі сталі та сприяло процесу сфероїдизації цих карбідів. В результаті цього при температурах середнього та високого додаткового відпускання значно знизився знос сталі (приблизно в 1,5 раз).

Висновки. 1. Зносостійкість ножів бульдозерів не знаходиться в однозначній залежності від твердості. 2. Найвищий рівень зносостійкості має сталь 36Г2СР. 3. Термічна обробка сталі 36Г2СР складається з гартування від 840°С і низького відпускання при 200°С. 4. Подвійне відпускання сталі 36Г2СР збільшує зносостійкість приблизно в 1,5 рази проти одинарного відпускання.

Література: 1. Романов Ю.С., Браташевский Л.Ю. Исследование и создание режущих элементов бульдозеров повышенной износостойкости. - Строительные материалы. М., 1987, №4. с. 30 - 35. 2. Легенда Н.Ф., Булкина Н.И., Браташевский А.Ю., Литвиненко Ю.П. Влияние режимов термической обработки среднеуглеродистых сталей на работоспособность режущих элементов землеройно — транспортных машин. - тез. докл. конф. "Повышенне качества металлопроката путем термической и термомеханической обработки". Днепропетровск, 1985, с. 35 - 36. 3. Браташевський О.Ю., Полякова А.Г., Горбачова Л.В., Польотов ВА. Зносостійка сталь для робочих елементів землерійних машин. - Труді 4-й Международной н.-т. конференции, 23 - 24 октября 2001 г. - Харьков: ХНПК "ФЭД", 2001 г. - 300 - 340 с. 4. Мурот. Зависимость между свойствами материалов, используемых для изготовления ножей, и их стойкостью на знос. - ВЦП № 1 - 37391, 1982. Эхиме дайку кие. Дайсан бу Когаку 1981, т. № 4, 1387 - 1389.

УДК 621.923

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕНЕЕ ДЕФИЦИТНЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЛИТОВЫХ ТОРЦОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ

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

In work results of comparison of technological parameters various steels, face condensation used at manufacturing from relit are resulted.

Применяемая в настоящее время для изготовления релитовых торцовых уплотнений [1, 2, 3] сталь 08Х18Н10Т обладает повышенной сопротивляемостью межкристаллитной коррозии и рекомендуется для изделий, работающих в средах высокой

агрессивности, азотной и органической кислотами (исключая уксусную, щавелевую, муравьиную, молочную), в большинстве растворов солей органических и неорганических кислот при различных температурах. Как заменитель стали марок 12X18H10T и 08X18H10T для работы в средах средней агрессивности могут быть применены стали 9X18, 14X17H2, 08X22H6T и для слабо агрессивных сред – 30X13, 15X12ВНМФ содержание дефицитного никеля на 4–8% меньше.

Нержавеющая сталь марки 08X22H6T также обладает высокой коррозионной стойкостью в средах средней агрессивности. Характерным для сталей этой группы является относительно повышенные значения предела текучести и прочности при удовлетворительных характеристиках пластических свойств и сопротивляемости стали действию ударных нагрузок. К недостаткам данной стали следует отнести склонность к охрупчиванию в результате нагрева в интервале 400–750°C, при которых эксплуатация не рекомендуется. Для сталей этого типа характерной является прямая зависимость между повышением температуры нагрева металла и технологическими свойствами. На операциях горячего передела стали (на последней стадии) не рекомендуется прибегать к применению чрезмерно высоких температур нагрева (больше 1150°C), т.к. подобный режим способствует увеличению количества ферритной фазы и роста зерна, что может отрицательно отразиться на пластических свойствах металла.

Ввиду того, что торцовые уплотнения для погружных электродвигателей работают на границе пластовая жидкость – масло в течении длительного времени, возникла необходимость изготовления их из нержавеющей стали марки 08X18H10T, которая наилучшим образом удовлетворяет требованиям работы в данных условиях, зависящих от составов пластовой жидкости. Пластовая жидкость в своем составе может иметь: воды 99%, механических примесей 0,1 г/литр, сероводорода 0,01 г/литр, газовый фактор 80 м³/т.

В связи с тем, что нержавеющая сталь марки 08X18H10T имеет в своем составе остродефицитные компоненты, возникла необходимость заменить ее на сталь, которая удовлетворяла бы всем необходимым требованиям, предъявляемым к торцовым уплотнениям, и имела в своем составе как можно меньше остродефицитных компонентов. С этой целью были подобраны марки стали, которые могли бы по своим свойствам применяться взамен стали 08X18H10T.

Для проведения исследований были выбраны стали марок 08X22H6T, 9X18, 30X13, 14X17H2, 15X12ВНМФ, которые содержат в небольшом количестве или вообще не содержат никель. Изготовленные из этих сталей образцы были подвергнуты проверке на коррозионную стойкость в соляном растворе на водной основе с содержанием NaCl до 30 г/литр.

Образцы находились в соляном растворе 90 суток, раствор при этом перемешивался для насыщения воздухом, температура раствора была 20–50°C. После этого визуальным осмотром установлено, что сталь 9X19 подверглась коррозии по всей поверхности, на образце из стали 30X13 тоже был незначительный налет коррозии, а остальные образцы из сталей 08X22H6T, 14X17H2, 15X12ВНМФ не имели следов коррозии.

Для определения технологичности выбранных сталей были изготовлены макеты релитовых колец торцовых уплотнений и произведено их гальваническое меднение. Произведенная оценка сцепления медного покрытия с нержавеющей сталью показала положительный результат. Меднение производится для создания медного

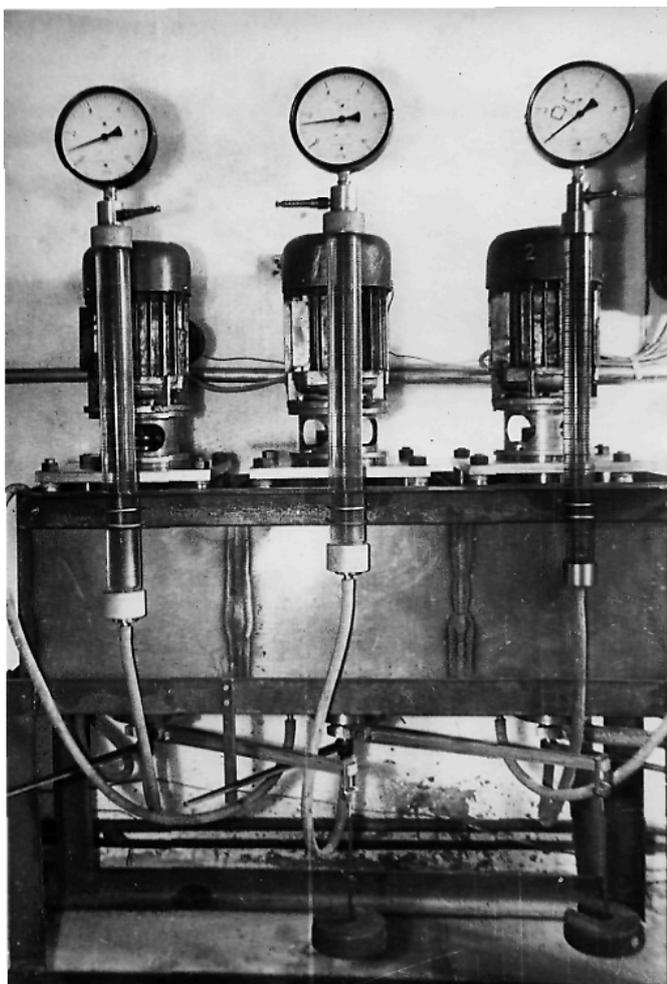


Рис. 1. Внешний вид станда.

основания в канавках заготовок колец, для лучшего сцепления релитового слоя со сталью при пропитке меди. В канавки макетов колец был запрессован литой карбид вольфрама (релит) и подпрессован медным порошком с давлением 400 МПа. Затем была произведена пропитка релитового слоя медью при температуре 1150°С в вакуумной печи. При охлаждении заготовок до температуры 50°С их выгрузили из печи и измерили твердость. Твердость стали 08Х22Н6Т до пропитки была $HB = 245$, после пропитки – $HB = 197$. Сталь 30Х13 до пропитки имела твердость $HB = 156$, после пропитки – $HRC = 52$, т.е. сталь прокалилась. Также увеличилась твердость стали 9Х18 (до пропитки $HB = 156$, после пропитки $HRC = 56$), стали 14Х17Н2 (до пропитки $HB = 269$, после пропитки $HRC = 38$), стали 15Х12ВНМФ (до пропитки $HB = 370$, после пропитки $HRC = 46$).

В связи с тем, что твердость колец повысилась и затрудняет механическую обработку, был произведен отпуск в вакуумной печи при температуре 600°С. После отпуска твердость колец составила: сталь 30Х13 ($HB = 200$), сталь 9Х18 ($HB = 240$), сталь 14Х17Н2 ($HB = 255$), сталь 15Х12ВНМФ ($HRC = 41$). После механической обработки макеты колец испытывались в абразивном растворе на водной основе на специальном станде (рис. 1) с целью определения износа стали кольца по наружному диаметру. Установлено, что после 224 часов испытаний вращающееся кольцо из стали 9Х18 изнашивалось на 0,06 мм, из стали 30Х13 – на 0,02 мм, из стали 14Х17Н2 – на 0,01 мм, а из стали 08Х22Н6Т износа не обнаружено. Одновременно проводились испытания колец на специальных стандах в соляном растворе на водной основе в течении 112 часов. Установлено, что макеты колец из стали 9Х18 покрылись продуктами коррозии по всей поверхности, омываемой соляным раствором. В меньшей степени продукты коррозии были на макетах из стали 30Х13, а на макетах из сталей 14Х17Н2 и 15Х12ВНМФ продукты коррозии отсутствовали.

После запечки и отпуска макетов релитовых колец, по одному кольцу из каждой марки нержавеющей стали было разрезано в поперечном сечении и сделаны шлифы. На них отчетливо было видно, что медь хорошо продифундировала в сталь на всех образцах макетов релитовых колец, рис. 2 (на фотографиях увеличение в 20 раз).

В результате проведенного поиска, который заключался в подборе материалов и испытании их на коррозионную стойкость, гальваническое меднение, прессовании релитового слоя и пропитке его медью в вакуумной печи, установлено, что стали марки 08Х22Н6Т, 30Х13, 14Х17Н2, 9Х18 и 15Х12ВНМФ могут заменить сталь 08Х18Н10Т вследствие меньшего содержания дефицитных компонентов.

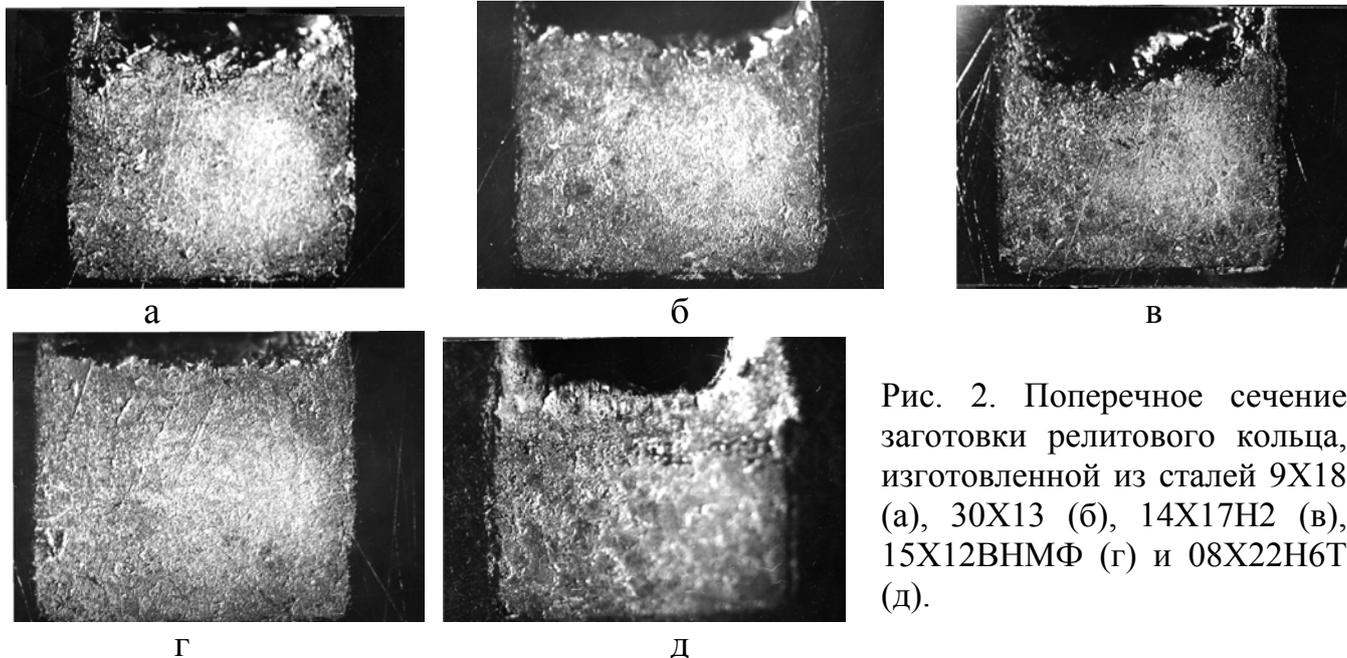


Рис. 2. Поперечное сечение заготовки релитового кольца, изготовленной из сталей 9X18 (а), 30X13 (б), 14X17H2 (в), 15X12ВНМФ (г) и 08X22H6T (д).

Литература: 1. Ткаченко В.П. Повышение эффективности технологии прецизионной обработки уплотнительных колец из композиционного материала на основе релита. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 2004. – 21 с. 2. Ткаченко В.П. Разработка промышленной технологии изготовления торцовых уплотнений для электробуровой техники // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2002. – Вип.9, т. 11. – С. 91-96. 3. Ткаченко В.П., Плужник Ю.Ф., Новиков Ф.В. Исследование и разработка эффективной технологии изготовления износостойких релитовых торцовых уплотнений // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2004. – № 44 – С. 123-130.

УДК 621.315

КРИТЕРИИ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВ ПОТОЧНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА СОВРЕМЕННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭКСТРУЗИОННЫХ ЛИНИЯХ.

Золотарев В.М., канд.техн.наук, **Карпушенко В.П.**, канд.экон.наук, **Науменко А.А.**,
канд.техн.наук, **Бузько С.В.**, **Золотарев В.В.**, (г. Харьков, Украина)

The method of criteria defining of using the spark testers for the check of the insulations and jackets during manufacturing at modern automated extrusion lines.

Современные способы производства изоляционных элементов кабелей и проводов основываются на применении автоматизированных экструзионных линий переработки и наложения пластмасс. Каждая экструзионная линия характеризуется определенным функциональным соотношением между толщиной изоляционного элемента (изоляции, оболочки, шлангового покрова) и скоростью его движения в процессе наложения. С другой стороны, толщина изоляционного элемента определяет величину емкостной электрической нагрузки применяемого средства его испытаний напряжением на проход в конкретной экструзионной линии. Следовательно, функциональные характеристики технологических линий наложения изоляции и средств ее электрических испытаний оказываются связанными, а выбор конкретного испытательного средства для той или иной экструзионной линии представляет значительный практический интерес.

В [1] было показано, что функциональная зависимость, характеризующая рабо-

ту экструзионных технологических линий для изготовления изоляционных элементов кабельных изделий имеет вид

$$P\delta = K / V, \quad (1)$$

где P - периметр поперечного сечения изоляционного элемента; δ - его толщина в радиальном направлении; K - коэффициент пропорциональности; V - скорость движения изделия в линии.

Современные средства испытаний изоляционных элементов кабельных изделий напряжением на проход реализуют в настоящее время требования следующих основных стандартов.

1. ГОСТ 2990-78. Основные его требования сводятся к тому, что время действия электрического напряжения на изоляционный элемент не должно быть меньшим $t=0,06$ с, а значит, при заданной длине L испытательного электрода, скорость движения V изделия в экструзионной линии должна быть не больше, чем

$$V = L / t. \quad (2)$$

2. Стандарт UL –1581(США) устанавливает, что на любую точку изоляционного элемента должны воздействовать n периодов испытательного напряжения. Таким образом, связь между скоростью изделия, числом периодов испытательного напряжения, длиной испытательного электрода и частотой испытательного напряжения f имеет вид

$$V = Lf / n. \quad (3)$$

3. Британский стандарт BS 5099:1971 устанавливает время воздействия испытательного напряжения на изоляционный элемент равное 0,05 с, а значит и в этом случае скорость движения изоляционного элемента также может быть определена по (2). Реактивная мощность N нагрузки испытательного средства, нагруженного на коаксиальный конденсатор с погонной емкостью C , изоляцией которого служит изоляционный элемент на длине испытательного электрода, равна.

$$N = 2\pi \cdot f \cdot U^2 C \cdot L, \quad (4)$$

где U - амплитуда испытательного напряжения.

Эту реактивная мощность ограничивают значением 200 Вт из соображений безопасности работы обслуживающего персонала. Используя теперь (2), (3), (4) можно записать функциональные зависимости, характеризующие работу испытательных средств, реализующих соответственно требования:

стандартов ГОСТ и BS:

$$U^2 C = N / 2\pi \cdot f \cdot t \cdot V, \quad (5)$$

стандарта UL:

$$U^2 C = N / 2\pi \cdot n \cdot V. \quad (6)$$

Установим теперь связь между (1) и (5), (6). Погонная емкость коаксиального конденсатора заполненного диэлектриком с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ , находящегося между цилиндрами радиусов R и r равна:

$$\tilde{N} = 2\pi\epsilon\epsilon_0 / \ln(R / r) \quad (7)$$

где ϵ_0 - абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; $R = r + \delta$.

Здесь R и r есть внешний и внутренний радиусы накладываемого экструзионной линией изоляционного элемента, соответственно. Разлагая теперь (7) в ряд Маклорена по малому параметру δ / r и, ограничиваясь первым членом ряда, можно записать (1) в виде:

$$U^2C \approx K/V. \quad (8)$$

Коэффициент K определяется из паспорта конкретной экструзионной линии.

Сравнив (5), (6) и (8) можно видеть, что функциональная зависимость, характеризующая работу экструзионной линии и функциональная зависимость, характеризующая работу средств испытаний выражена в одних и тех же координатах U^2C и V . В соответствии с (8), работа экструзионной линии в каком-либо режиме в координатах U^2C и V характеризуется одной точкой M . Работа конкретного средства поточного электрического контроля, воспроизводящего требования того или иного стандарта, характеризуется определённой кривой $U^2C = f(V)$. Отсюда следует критерий применимости средства поточного контроля для работы конкретной экструзионной линии, а именно: если точка M лежит выше кривой $f(V)$, то данное средство будет успешно работать в этой экструзионной линии.

Используя теперь (5), (6), (8), можно рассчитать возможность применения испытательных средств, реализующих требования различных стандартов испытаний для технологических линий применяемых в кабельной технике (табл.1).

Таблица 1

Перерабатываемый материал, стандарт испытаний		Диаметр червяка экструдера экструзионной линии, мм				
		45	60	90	125	160
Полиэтилен	UL - 1581	+	+	+	-	-
	BS 5099 : 1974	-	-	+	+	+
Поливинилхлорид	ГОСТ 2990-74	-	-	-	+	+

Выводы. Применение средств поточного электрического контроля (искровых тестеров), работающих на высокой частоте (стандарт UL-1581) более предпочтительно в высокоскоростных экструзионных линиях с малым диаметром червяка. В тихоходных линиях с большим диаметром червяка наиболее предпочтительно применение приборов, реализующих требования ГОСТ и BS.

Литература: 1. Золотарёв В.М. Электрический метод и прибор для поточного контроля параметров изоляции кабельных изделий. Дис. на соискание уч. степ. канд. техн. наук. Харьков, НТУ «ХПИ», 2002 г, 194 стр.

УДК 669.620.187

МИКРОСТРУКТУРА И ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ШТАМПОВКОЙ ИЗ ЖИДКОГО СОСТОЯНИЯ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ГАЗОСТАТИЧЕСКИМ ОБЪЕМНЫМ УПЛОТНЕНИЕМ

Чуйкова Е.В. (г. Харьков, Украина)

Investigated are the microstructure and fracture character of AL-25 alloy punching, received under pressing in the liquid station and hardener additionally by gasstatic volumetric treatment.

С каждым годом все более широкое применение находят специальные виды и способы литья, которые обеспечивают получение поршней ДВС с высокими физико-механическими свойствами и минимальными допусками на механическую обработку.

Формирование большинства свойств отливки определяет первичная кристаллизация. Улучшение эксплуатационных свойств литой детали достигается главным

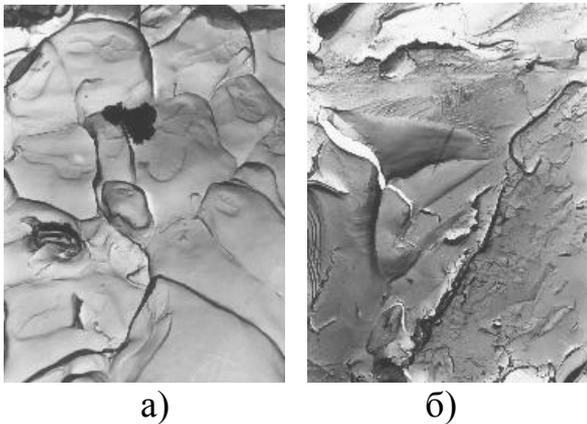


Рис. 1. Микроструктура изломов разрывных образцов из заготовки, термически обработанной после штамповки из жидкого состояния; $\times 12000$.

образом в результате повышения физической и химической однородности металла, сокращения макро-, микро- и субмикроскопических дефектов, значительная часть которых возникает в процессе формирования отливки в литейной форме.

Среди процессов, способствующих значительному повышению качества отливок, важное место занимает штамповка жидкого металла, которая является наиболее прогрессивным методом в технологии изготовления сложных деталей из цветных сплавов. Основным параметром, характеризующим процесс формирования отливки поршня, является давление. В этой связи

представляет интерес исследование влияния давления на формирование кристаллической структуры полученной отливки, а также исследование влияния газостатической объемной обработки при доуплотнении уже сформированных отливок на микроструктуру и характер разрушения закристаллизованного под давлением сплава на алюминиевой основе эвтектического типа АЛ-25 [1].

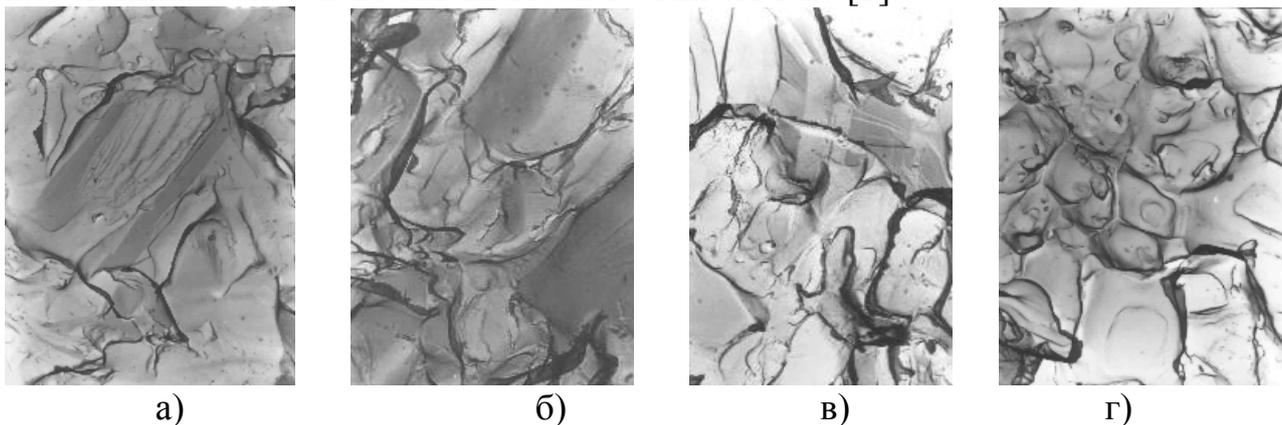


Рис. 2. Микростроение изломов при статическом изгибе образцов из заготовки, термически обработанной после штамповки из жидкого состояния: а, в – $\times 14000$; б, г – $\times 5500$.

В настоящей работе методами металлографии, макро- и электронномикроскопической фрактографии изучены микроструктура и строение изломов образцов из заготовок сплава АЛ-25, полученных методом штамповки из жидкого состояния, а также после дополнительного газостатического объемного уплотнения.

Фрактографическому анализу подвергали гладкие круглые образцы ($\varnothing 6$ мм), разрушенные растяжением, и призматические образцы без концентраторов напряжений (сечением 6×6 мм), испытанные статическим изгибом.

Микроструктура сплава АЛ-25 после закалки и старения состоит из α - твердого раствора на базе Al и кремнистой эвтектики ($\alpha + \text{Si}$); α -твердый раствор упрочнен дисперсными выделениями вторичных фаз. После термообработки литой заготовки микроструктура сплава имеет грубодендритное строение. После термообработки заготовки, полученной штамповкой из жидкого состояния, микроструктура также имеет дендритный характер, однако она значительно более равномерна и мелкодисперсна, чем микроструктура литой заготовки. Газостатическая обработка не вносит существенных изменений в микроструктуру заготовки, полученной штамповкой из жидкого металла.

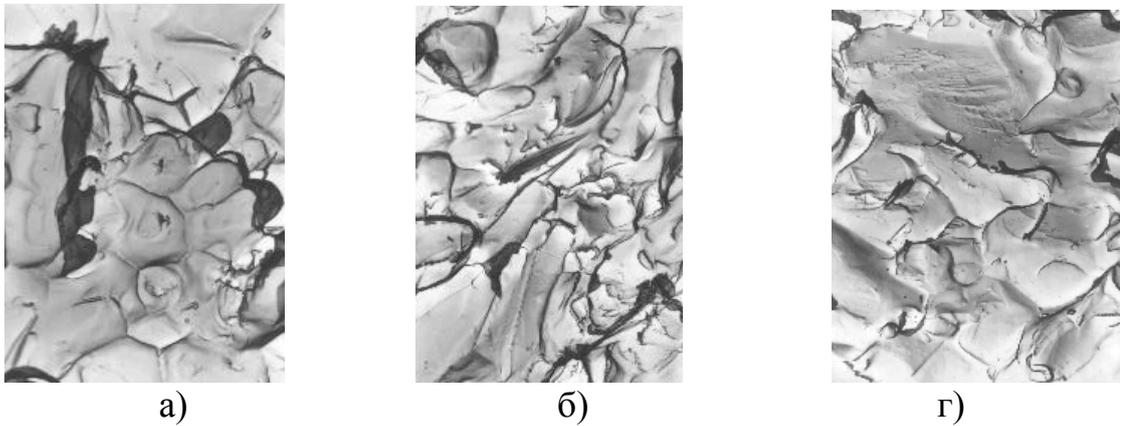


Рис. 3. Микростроение изломов разрывных образцов из заготовки, подвергнутой после штамповки из жидкого состояния газостатической обработке; $\times 12000$.

По данным фрактографического анализа характер разрушения термообработанных образцов из сплава АЛ-25 после штамповки из жидкого состояния как при растяжении, так и при статическом изгибе смешанный: присутствуют элементы хрупкого (транскристаллитный скол, межзеренное разрушение) и вязкого (ямочный и квазискольный отрыв) микромеханизмов разрушения (рис. 1). Выявленные особенности строения ямок свидетельствуют о том, что при разрушении сплава по эвтектике рост ямок в большинстве случаев инициируется хрупким разрушением частиц кремния. В структуре изломов, чаще всего вблизи участков межзеренного разрушения,

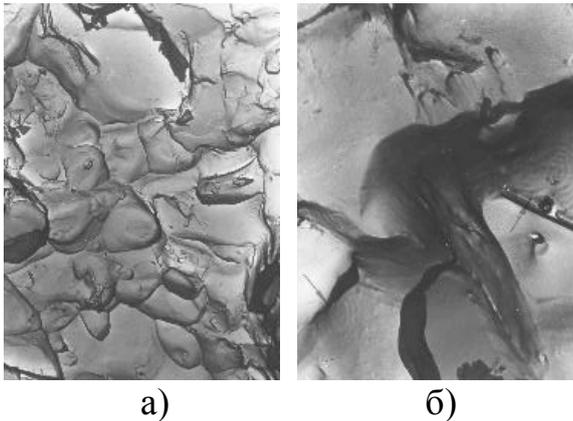


Рис.4. Микростроение изломов при статическом изгибе образцов из заготовки, подвергнутой после штамповки из жидкого состояния газостатической обработке: а - $\times 10000$; б - $\times 36000$.

выявляются локализованные участки со специфическим геометрическим микрорельефом, свидетельствующим о наличии микронесплошностей (микропор), характерных для литого металла [2].

Влияние газостатической обработки на микростроение изломов сплава АЛ-25 после штамповки из жидкого состояния проявляется в измельчении элементов микрорельефа, некотором увеличении энергоемкости излома и уменьшении количества и размеров выявляемых микропор (рис. 2). Это дает основание полагать, что газостатическая обработка может положительно сказываться на сопротивлении сплава зарождению и развитию трещины.

В результате проведенного исследования выявлено, что газостатическая обработка, практически не влияя на микроструктуру и макростроение изломов образцов сплава АЛ-25, полученных штамповкой из жидкого состояния, оказывает положительное влияние на характер разрушения сплава как при растяжении, так и при статическом изгибе. Это влияние выражается в измельчении элементов микрорельефа, некотором увеличении энергоемкости излома и уменьшении количества и размеров выявляемых микропор.

Литература: 1. Кристаллизация металлов и сплавов под давлением. Батышев А.И. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. – с. 144. 2. Фрактография – средство диагностики разрушенных деталей/ М.А. Балтер, А.П. Любченко, С.И. Аксенова и др. – М.: Машиностроение, 1987.

**ПОЛИКОМПОНЕНТНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ –
ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ**

Цюрюпа В.Н., канд. техн. наук, **Любченко А.П.**, докт. техн. наук,
Сатановский Е.А., канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)

The article deals with a cathode electrooleposition Cr, Ni playthings anel there alloys. Electrolyte's components effect on Kinetie characteristics of Cr, Ni alloy cathoche electrodeposition has been anabysed. Temperature effect on cleetwlysis regime has dttn analysed.

Одним из эффективных методов создания покрытий с заданными свойствами является легирование покрытий различными элементами. В последние десятилетия в Центральной лаборатории ГП «Завод им. Малышева» проведены работы по получению бинарных сплавов и поликомпонентных систем.

Известно [1, 2], что электролитический хром обладает рядом ценных эксплуатационных свойств: высокой твердостью, износостойкостью, коррозионной стойкостью. Тем не менее, эти свойства могут быть улучшены. Одним из направлений позволяющих получать покрытия с заданными свойствами, является микролегирование другими элементами.

Лабораторией металлопокрытий ГП «Завод им. Малышева» разработано и внедрено в серийное производство хромирование покрытия, которое используется для упрочнения и восстановления деталей, работающих в условиях интенсивного износа и высоких температур. Указанное покрытие характеризуется хорошей адгезией к различным сталям, включая высоколегированные, в том числе к поверхностям, обработанным ТВЧ, азотированным. В процессе деформации образцов из высоколегированных сталей с покрытием хром-вольфрам толщиной до 300 мкм, последнее практически не отслаивается, а деформируется вместе с основным металлом, что является косвенным свидетельством его пластичности.

Твердость покрытия хром-вольфрам достигает 11000-12000 МПа, причем ее высокие значения сохраняются до 650°C.

Испытаниями на износ образцов и натуральных деталей показано, что износостойкость покрытия хром-вольфрам в 1,5-2 раза выше износостойкости хромового покрытия, а износ сопряженного материала меньше.

Полученный комплекс свойств сплава на основе хрома позволил использовать данное покрытие для повышения надежности и долговечности таких тяжело нагруженных деталей, как поршневые кольца, штоки гидроамортизатора и др.

Для упрочнения и защиты от коррозии деталей сложной геометрии в гальваническом производстве в течение многих лет использовался сплав никель-вольфрам. Однако, низкая производительность процесса его получения, низкая твердость и высокие внутренние напряжения ограничивают возможность его применения. В ЦЛГП «Завод им. Малышева» был получен тройной сплав никель-фосфор-медь, представляющий в исходном состоянии твердый раствор замещения меди и фосфора в решетке кубического гранцентрированного β -никеля. Скорость осаждения тройного сплава увеличилась вдвое, что позволило повысить коррозионную стойкость покрытия. твердость покрытия никель-медь-фосфор после термообработки выше по сравнению с твердостью обычных бинарных сплавов на основе никеля и составляет 10000-11000 МПа. Рентгенографические исследования покрытия никель-медь-

фосфор обнаружили значительное снижение внутренних напряжений (~ в 2 раза), что позволяет осаждать покрытия толщиной до 40 мкм.

Композиционные электрохимические покрытия (КЭП) совмещают в себе свойства металлов и неметаллов. КЭП осаждаются из суспензий, представляющих собой электролит с добавкой определенного количества высокодисперсного порошка. При наложении электрического тока на поверхность покрываемого изделия осаждается металл (первая фаза или матрица) и частицы порошка (вторая фаза), которые цементируются матрицей.

На нашем заводе указанный метод нашел применение для повышения антифрикционных свойств, хромированных поршневых колец. Разработано и внедрено в серийное производство композиционное покрытие на основе меди с включением ~ 5% природного дисульфида молибдена.

Длительная эксплуатация двигателей магистральных тепловозов, оборудованных такими кольцами подтвердила их высокие антифрикционные свойства: по длительности действия, эффективности ускорения приработки и стойкости к задиорообразованию КЭП Cu-MoS₂ значительно превосходит известные покрытия, применяемые для улучшения приработки.

В заключение следует отметить, что внедрение поликомпонентных электролитических покрытий в серийное производство позволило увеличить надежность и долговечность ответственных деталей, работающих в тяжелонагруженных условиях.

Литература: 1. Гальванические покрытия в машиностроении. Справочник. Под ред. М.А. Шлугера. – М. Машиностроение, 1985, 240с. 2. Гальванотехника. Справочник. Под ред. А.А. Гринберга, - М. Металлургия, 1987, 735с.

УДК 539.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛАХ ТРАНСПОРТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Пашкова Г. И. (г. Харьков, Украина)

Influencing of different hardening treatments to allocation of residual stresses in nicks of crankshafts of transport diesel engines was investigated.

Is rotined, that optimal treating is the normalization reshaping on a surface cramping residual stresses.

На эксплуатационные свойства деталей машин наряду с геометрическими параметрами большое влияние оказывает физико-механическое состояние поверхности, и в частности, остаточные напряжения [1, 2]. Определение величины и знака остаточных напряжений, возникающих в деталях в результате обработки и упрочнения, позволяет прогнозировать ее надежность и долговечность.

Основными методами определения остаточных напряжений являются механические и рентгеновские. Весьма перспективны для промышленного применения электрофизические и оптические методы. Теоретические основы этих методов достаточно хорошо разработаны и широко используются для моделей и деталей небольших размеров простой формы (цилиндр, труба, пластина и т. д.) [3, 4]. Однако для деталей больших размеров и сложной формы применение этих методов не всегда возможно или достаточно затруднено. В таких случаях необходимо использование локальных механических методов измерений или рентгеновского способа с применением специальной переносной аппаратуры.

Наиболее известными из механических методов, применяемых для локальных измерений остаточных напряжений, являются метод «отверстий» [3, 5], «канавок» [6], «трепанаций» или «столбика» [1, 3, 7].

Проведение специальной работы по оценке точности указанных методов в сравнении друг с другом и относительно точными методами, условно принимаемыми за эталонные (рентгеновской тензометрии [4] и «колец и полосок» [3]), позволило сделать вывод о том, что оптимальным для локальных измерений является механический метод «отверстий».

Известно [8], что коленчатые валы транспортных дизелей являются ответственными деталями, подвергающимися высоким циклическим нагрузкам, в связи с чем их эксплуатационные характеристики в значительной степени определяются сопротивлением усталости и уровнем остаточных напряжений.

Целью настоящей работы являлось исследование распределения остаточных напряжений в шейках коленчатых валов транспортных дизелей для оценки эффективности различных методов упрочнения.

Определение остаточных напряжений производили на реальных коленчатых валах, изготовленных из высокопрочного чугуна с шаровидной формой включений графита, модифицированного Mg, следующего химического 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.

Исследовали следующие варианты упрочнения валов:

1. Нормализация при $900 \pm 20^\circ\text{C}$, выдержка 8 ч, ускоренное охлаждение в струе воздуха, отпуск при $625 \pm 15^\circ\text{C}$, 8 ч.

2. Закалка шеек токами высокой частоты (ТВЧ), включающая предварительный подогрев до $300\text{--}350^\circ\text{C}$, нагрев токами высокой частоты до $955\text{--}990^\circ\text{C}$, охлаждение на воздухе; отпуск при $370 \pm 10^\circ\text{C}$, 12 ч.

3. Нормализация и последующее упрочнение шеек методом электроискрового легирования (ЭИЛ) сталью 12X18H10T.

В качестве исходного варианта исследовали валы, изготовленные по технологии ранней выбивки с последующим отпуском при $680 \pm 20^\circ\text{C}$, 6 ч.

Твердость материала после ранней выбивки и отпуска составляла HB 217...268, после нормализации – HB 234...283.

Глубина упрочненного ТВЧ слоя – 1,5...5 мм, твердость – HRC₃ 41...49.

Мощность разряда при упрочнении ЭИЛ составляла 0,9 кВт. Толщина упрочненного слоя 30...260 мкм, микротвердость H₂₀ 5...14 ГПа.

Для определения величины и знака остаточных напряжений на поверхности шеек коленчатых валов был использован метод «отверстий».

Сущность его состоит в перераспределении напряжений в результате рассеечения равновесного поля путем сверления отверстия. Получаемые при этом деформации вблизи одного из простейших концентраторов – круглого отверстия – пересчитываются в напряжения, имевшиеся до рассеечения, по известным формулам [3, 5]. Указанный метод является достаточно простым, экспрессным и позволяет оперативно получить интегральную оценку остаточных напряжений в поверхностном слое детали.

Исследование напряженного состояния материала производили в зонах I и II (см. рис.). Отличие этих зон заключается в различных условиях теплоотвода при остывании металла после отливки и термической обработки.

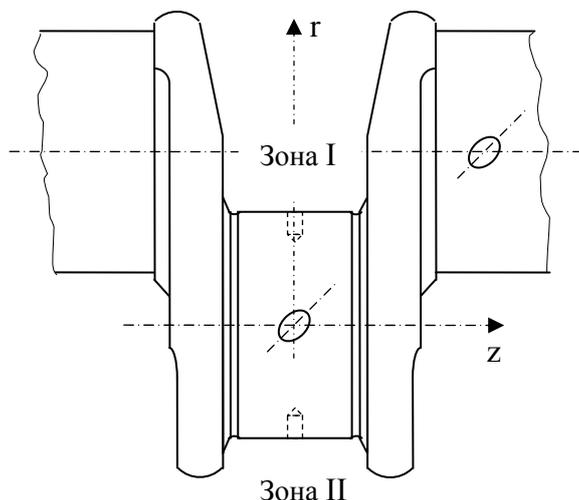


Рис. Зоны исследования остаточных напряжений методом «отверстий».

В центральной части каждой из исследуемых шеек в зонах I и II клеим «циакрин ЭО» наклеивали тензорезисторы типа КФ5 П1-5-100-Б12 в виде прямоугольных розеток. Термокомпенсационные тензорезисторы наклеивали аналогично рабочим на образцы из того же материала, что и коленчатый вал.

На расстоянии 2,5 мм от края решеток тензорезисторов сверлили отверстия диаметром 12 мм глубиной 17...20 мм. Перед сверлением тензорезисторы защищали резиновыми накладками во избежание попадания стружки. Сверление осуществляли сверлами с твердосплавными пластинами с использованием специально спроектированного и из-

готовленного кондуктора, обеспечивающего точность расположения отверстия.

Для определения деформаций фиксировали показания тензорезисторов до и после сверления отверстия с помощью прибора ИСД-3 с фактической чувствительностью $0,94 \cdot 10^{-5}$ единиц относительной деформации. Расчет значений напряжений производили для розеточных схем по формулам [5].

Результаты определения величины осевых (σ_z) и тангенциальных (σ_θ) остаточных напряжений на поверхности шеек коленчатых валов приведены в таблице.

Распределение остаточных напряжений на поверхности отпущенных после ранней выбивки валов обусловлено процессами деформирования литой заготовки при остывании. В шейках формируются как растягивающие, так и сжимающие остаточные напряжения. Максимальные их значения составляют соответственно 68 МПа и 31 МПа.

Таблица

Значения остаточных напряжений в коленчатых валах из высокопрочного чугуна

Зона измерения		Способ упрочнения							
		Ранняя вы- бивка, отпуск		Закалка ТВЧ		Нормализация		Нормализация с последую- щим ЭИЛ	
		σ_z , МПа	σ_θ , МПа	σ_z , МПа	σ_θ , МПа	σ_z , МПа	σ_θ , МПа	σ_z , МПа	σ_θ , МПа
Коренные шейки	I	+15... +17	+37... +82	+66... +68	+99... +134	-43...-13	-28...-3	-	-
	II	- 14... - 9	- 31... - 16	+19... +41	+ 42... + 86	-46...-38	-28...-2	-	-
Шатунные шейки	I	- 4... + 52	+20... +68	+15... +25	+ 28... + 38	-55...-14	-19...-6	+6,5... +20	+13,4... +20,3
	II	+19... +56	+ 6... + 48	+29... +55	+ 44... + 57	-19...- 7	-33...-5	+15... +56	+19,2... +45,5

Иная картина наблюдается в распределении остаточных напряжений после закалки ТВЧ. Как осевые, так и тангенциальные напряжения являются растягивающими. При этом тангенциальные напряжения в 1,5-2 раза больше осевых по абсолютной величине. Появление таких напряжений в тонком поверхностном слое мо-

жет быть объяснено неблагоприятным соотношением диаметров шеек и протяженности закаленного слоя. Относительно малая длина шеек может служить причиной взаимного влияния двух зон обрыва закаленного слоя, что приводит к формированию напряжений растяжения величиной до 134 МПа.

Принципиально иной характер распределения остаточных напряжений отмечается в коленчатых валах после нормализации. Напряжения во всех случаях являются сжимающими независимо от места измерения. Максимальная величина их достигает 55 МПа на шатунной шейке и 46 МПа на коренной. Вероятно, решающим фактором формирования полученных эпюр напряжений является ускоренное охлаждение валов в процессе нормализации.

Результаты определения значений осевых и тангенциальных составляющих остаточных напряжений, возникших в результате упрочнения валов после нормализации электроискровым легированием, свидетельствуют о переходе сжимающих напряжений в растягивающие величиной до 56 МПа. При этом абсолютная величина напряжений в зоне II (с лучшими условиями теплоотвода) существенно выше, чем в зоне I.

Появление растягивающих остаточных напряжений обусловлено, вероятнее всего, явлениями вторичной закалки, реализуемыми в процессе электроискрового упрочнения.

Анализируя полученные результаты исследований, можно сделать вывод, что применение упрочняющих поверхностных обработок (ТВЧ, ЭИЛ) шеек коленчатых валов приводит к формированию в них растягивающих остаточных напряжений.

Оптимальным способом обработки с точки зрения распределения остаточных напряжений является нормализация отливок, которая приводит к формированию в поверхностных слоях материала напряжений сжатия, оказывающих положительное влияние на сопротивление усталости чугуновых коленчатых валов транспортных дизелей.

Литература: 1. Технологические остаточные напряжения. / Под ред. А. В. Подзея. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с. 2. Чепи П. А., Андрияшин В. А. Эксплуатационные свойства упрочнённых деталей. – Минск: Наука и техника, 1988. – 192 с. 3. Биргер И. А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с. 4. Уманский Я. С. Рентгенография металлов и полупроводников. – М.: Металлургия, 1969. – 496 с. 5. Михайлов О. Н. Метод отверстия // Остаточные напряжения в заготовках и деталях крупных машин / под ред. О. Н. Михайлова. – Свердловск: НИИТЯЖМАШ Уралмашзавода, 1971. – 191 с. 6. Михайлов О. Н. Метод канавки // Остаточные напряжения в заготовках и деталях крупных машин / под ред. О. Н. Михайлова. – Свердловск: НИИТЯЖМАШ Уралмашзавода, 1971. – 191 с. 7. Остаточные напряжения в металлах и металлических конструкциях / под ред. В. Р. Осгуда – М.: Издательство иностранной литературы, 1957. – 395 с. 8. Кудрявцев И. В., Наумченков Н. Е., Саввина Н. М. Усталость крупных деталей машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 237 с.

УДК 621.791: 620.178

ОБ УСТАЛОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ БЛОКОВ ТРАНСПОРТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Пашкова Г. И., Степанюк А. И. (г. Харьков, Украина)

The results of tests of flat welded samples executed with use of a powder welding wire and on special technology are given.

Из большого числа факторов, влияющих на сопротивление усталости деталей машин, испытывающих переменные нагружения, наиболее важным является кон-

центрация напряжений. В подавляющем большинстве случаев трещины зарождаются в зонах изменения сечения или нарушения поверхностного слоя.

Сварные соединения не составляют исключения. Места переходов шва на основной металл и особенно дефектные участки швов неоднократно становились очагами усталостных разрушений машин и сооружений [1]. Сварные конструкции широко применяются в современном дизелестроении. По такой технологии изготавливают блоки мощных транспортных дизелей типов Д100 и Д80. В процессе эксплуатации двигателей иногда отмечается образование трещин как непосредственно в зоне сварных швов, так и по линии сплавления шва с основным металлом.

В связи с этим представляет интерес определение возможности применения для повышения качества сварки прогрессивных сварочных материалов, в частности, порошковой проволоки типа ПП-АС, а также разработка технологии заварки трещин.

Изменения в технологии сварки либо применение новых сварочных материалов могут привести к снижению сопротивления усталости сварных соединений. Так как элементы блоков дизелей работают в условиях значительных циклических нагрузок, необходимо проведение испытаний на усталость образцов сварных швов или деталей [2]. Испытывали плоские образцы из стали 20 размерами 400×60×14 мм как цельные (без сварки), так и с имитацией трещины, заваренной по специально разработанной ремонтной технологии исправления трещин на вертикальных листах блоков дизелей.

Сварка производилась электродами ЛО-1 при силе тока 90-110 А.

Для проведения испытаний на усталость использовали универсальную испытательную машину с гидропульсатором типа МУП-50, позволяющую создавать максимальную циклическую нагрузку 250 кН с точностью $\pm 1\%$, и стандартное приспособление для испытаний на растяжение плоских образцов.

Образцы подвергали знакопостоянному осевому циклическому растяжению с коэффициентом асимметрии цикла $r = 0,3$. Усиления швов не снимались.

Частота приложения нагрузки 500 циклов/мин. Условный предел выносливости определяли на базе $2 \cdot 10^6$ циклов. Критерием окончания испытаний являлось полное разрушение образца.

Известно [1], что на сопротивление усталости оказывает существенное влияние остаточное напряженное состояние в зоне сварного шва. Остаточные напряжения вблизи сварного шва и непосредственно в зоне шва определяли механическими методами «отверстий» [3] и «канавок» [4], а также рентгеновской тензометрией [5].

Результаты испытаний на усталость показали, что условный предел выносливости сварных образцов с заваркой трещин по ремонтной технологии составляет 38,5 % от условного предела выносливости цельных образцов. Такое значение является допустимым в соответствии с требованиями КД.

Значения остаточных напряжений, полученные в результате проведенных измерений, приведены в таблице 1.

Полученные результаты свидетельствуют об увеличении значений сжимающих остаточных напряжений в сварном соединении и появлении остаточных напряжений растяжения непосредственно в зоне сварного шва.

С целью совершенствования технологии сварки блоков в работе дополнительно исследовали эффективность применения новых сварочных материалов. Для получения качественных сварных швов предложено использовать для сварки порошковую проволоку типа ПП-АС диаметром 1,2 и 1,6 мм вместо применяемой в настоящее

время проволоки Св.08Г2С диаметром 1,2 мм.

Таблица 1

Значения остаточных напряжений в образцах из стали 20

Вариант изготовления		Значения остаточных напряжений, МПа		
		Метод «отверстий»	Метод «канавки»	Рентгеновский метод
Образцы без сварки		- 35...- 30	- 35...- 31	–
Образцы со сварным швом	вблизи сварного шва	- 150...- 115	- 220...- 130	- 290...- 220
	в зоне сварного шва	–	–	+ 145...+ 170

Провели сравнительные испытания плоских образцов из стали 20 со стыковыми сварными швами, выполненными с V-образной разделкой кромок – 20^{+2} по вариантам, указанным в таблице 2.

Испытания на усталость проводили по приведенной выше методике. Полученные значения условных пределов выносливости представлены в таблице 2.

Таблица 2

Значения пределов выносливости сварных образцов

Номер варианта	Тип сварочной проволоки	Режим сварки		Условный предел выносливости, МПа
		Напряжение U, В	Сила тока I, А	
1 (исходный)	Св.08Г2С	24	180	217
2	ПП-АС4	26	280	167
3	ПП-АС2	30	200	233

Результаты исследований показывают, что среди испытанных вариантов наибольшее значение условного предела выносливости получено для сварных образцов, изготовленных с применением порошковой проволоки ПП-АС2.

Для образцов 1 и 2 вариантов характерным является усталостное разрушение непосредственно в зоне сварного шва, а образцы варианта 3 чаще всего имеют излом по линии сплавления материала шва с основным металлом.

Установлено, что на качество сварного шва и на характеристики усталости сварных соединений в данном случае существенное влияние оказывают такие факторы как диаметр сварочной проволоки и параметры обработки (сила тока и напряжение).

Результаты проведенной работы позволили рекомендовать новую технологию ремонта и изготовления блоков дизелей типов Д100 и Д80, базирующуюся на использовании для выполнения сварных швов порошковой сварочной проволоки типа ПП-АС2 диаметром 1,2 мм.

Литература: 1. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений. – Киев: Наукова думка, 1973. – 214 с. 2. Кудрявцев И. В., Науменко Н. Е. Усталость сварных конструкций. – М.: Машиностроение, 1976. – 270 с. 3. Михайлов О. Н. Метод отверстия // Остаточные напряжения в заготовках и деталях крупных машин / под ред. О. Н. Михайлова. – Свердловск: НИИТЯЖМАШ Уралмашзавода, 1971. – 191с. 4. Михайлов О. Н. Метод канавки // Остаточные напряжения в заготовках и деталях крупных машин / под ред. О. Н. Михайлова. – Свердловск: НИИТЯЖМАШ Уралмашзавода, 1971. – 191 с. 5. Уманский Я. С. Рентгенография металлов и полупроводников. – М.: Металлургия, 1969. – 496 с.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОСТРУКЦИИ ПЬЕЗОСОРБЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ

Орехов С.Л., канд. техн. наук, **Каракуркчи Д.А.**, **Гайнутдинов А.В.**,
Молчанова Л.В. (г. Харьков, Украина)

In the given message the design of piezoelectric quartz sensor controls of chemical substances, which not containing of contacts is shown. Such technical decision allows to increase sensitivity and accuracy of measurement, and also to lower cost of the device and will raise universality of use.

В санитарном законодательстве Украины огромное внимание уделяется вопросам предупреждения профессиональных отравлений и заболеваний. Профилактика профинтоксикаций является одним из неотъемлемых элементов проектирования и функционирования технологических процессов и промышленных предприятий. Одним из основных направлений защиты здоровья персонала предприятия является гигиеническое нормирование производственной воздушной среды. Удобный и эффективный контроль наиболее токсичных веществ, попадающих в организм респираторным путем, осуществляется с помощью специальных технических систем – газоанализаторов (газосигнализаторов) [1, 3, 4].

Из многих видов газосигнализаторов некоторыми выгодными характеристиками обладают газосигнализаторы с чувствительным элементом на основе пьезокварцевого резонатора [5].

Пьезосорбционные датчики (ПД) или пьезорезонаторы (ПР), получившие распространение в аналитической химии, представляют собой АТ-срезы α -кварца, который широко используется в полупроводниковой электронике как генератор стабильной резонансной частоты. Такое применение монокристаллов кварца основано на явлении обратного пьезоэффекта, который состоит в том, что под действием электрического поля некоторые кристаллические тела, называемые пьезоэлектриками (ПЭ), сжимаются или расширяются в зависимости от направления вектора напряженности электрического поля. Интенсивность такого изменения линейных размеров у кристаллических ПЭ зависит от направления вектора напряженности электрического поля относительно осей кристалла.

Современные ПД представляют собой кварцевые пластины, имеющие значение резонансной частоты $f_{(\delta\hat{a}\hat{c})0}$ в пределах 5 – 15 МГц, с покрытием, которое селективно адсорбирует определяемое вещество из окружающей среды. На пластину наносятся два контакта, подается переменное электрическое поле и проводится измерение $f_{(\delta\hat{a}\hat{c})i}$. В процессе адсорбции значение $f_{(\delta\hat{a}\hat{c})i}$ уменьшается соответственно увеличению массы. По результатам измерения величины $f_{(\delta\hat{a}\hat{c})i}$ строят градуировочный график в виде зависимости резонансной частоты от приращения массы (времени) или вычисляют Δm согласно (1-3) [0, 7, 9].

ПД на основе кварца используют для определения широкого ассортимента тех классов химических соединений, для которых удастся подобрать оптимальный адсорбент (табл.1) и способ его нанесения.

Диапазон определяемых данным методом концентраций можно варьировать от миллионных долей до десятков мг/м³. Теоретически достижим предел детектирования массы порядка 10^{-12} – 10^{-11} г с погрешностью измерения 1–2%. С учетом высокой

селективности покрытия и природы аналитического сигнала (электрическая частота, для которой существуют достаточно точные методы измерения с практически мгновенным фиксированием значения), метод представляется одним из самых точных и экспрессных физико-химических методов измерения концентраций химических соединений при условии существования необходимого сорбционного покрытия и метода его нанесения. Такая совокупность высоких целевых характеристик (чувствительность, точность, экспрессность, ассортимент определяемых веществ) недостижима при использовании электрохимических, полупроводниковых, спектрометрических, ионизационных или каталитических детекторов, не говоря уже о традиционных химических методах.

Применение пьезорезонаторных пластин из кварца для анализа химических веществ основано на изменении резонансной частоты при изменении ее массы. В 1959 г. Sauerbrey эмпирическим путем установил соотношение между приращением массы пластины и изменением ее резонансной частоты (1):

$$f_{(\delta a_{\zeta})i} - f_{(\delta a_{\zeta})0} = -2\Delta f_{(\delta a_{\zeta})0} \left[\frac{\Delta m}{A\sqrt{\mu_q \rho_q}} \right], \quad (1)$$

где $f_{(\delta a_{\zeta})i}$ – резонансная частота в момент времени t_i , которой соответствует приращение массы Δm_i ; $f_{(\delta a_{\zeta})0}$ – исходная резонансная частота, в момент времени t_0 , которому соответствует приращение массы $\Delta m = 0$; A – пьезоэлектрически активная площадь; μ_q – модуль сдвига кварца; ρ_q – плотность кварца.

ПКК используются в большом количестве для контроля (управления) частоты в аппаратуре связи, и широко применяются как избирательные фильтры в электрических цепях. Доступны специальные кварцевые кристаллы, которые могут контролировать частоты порядка 10^{-9} и от этого сигнала могут быть получены очень точные промежутки времени. Другие, менее известные, использования включают генерацию ультразвуковых волн и измерения температуры, толщины испаряемых металлических пленок, точки росы газов и адсорбции газов на кварце. В последних трех применениях используется свойство очень высокой чувствительности кварца к примеси на его поверхности. Sauerbrey вывел соотношение между весом металлической пленки, осажденной на кварцевый кристалл, и приращением частоты (2).

$$\Delta F = 0,38 \cdot 10^6 \cdot \frac{F}{T} \cdot \frac{\Delta W}{A}. \quad (2)$$

Для обычных кристаллов справедливо соотношение (2):

$$\Delta F = 2,3 \cdot 10^6 \cdot F^2 \cdot \frac{\Delta W}{A}, \quad (3)$$

где ΔF – изменение частоты при осаждении металла; Гц; F – частота кварцевой пластины, МГц; T – толщина кварцевой пластины, см; ΔW – масса осажденной пленки, г; A – площадь кварцевой пластины или электрода, см².

В качестве перспективы развития этой сенсорной технологии в литературных источниках рассматривается поиск новых чувствительных фаз и методов их нанесения, а также методов снятия и обработки полезного сигнала. Нам также представляется целесообразным поиск пьезоэлектрических материалов с большими, по отношению к кварцу, значениями резонансной частоты и меньшими значениями плотно-

сти и модуля сдвига, при этом материал должен сохранять рабочие характеристики в условиях высоких и низких температур, агрессивных сред и быть восприимчивым к различным методам нанесения покрытий.

Целью данной работы является обоснование возможности повышения чувствительности и экспрессности пьезокварцевого метода путем поиска новых конструкций пьезосорбционных датчиков.

В [] показано, что существенное повышение точности, экспрессности и чувствительности метода можно достичь с использованием полупроводниковых материалов $A^{III}B^V$, среди которых наибольшее распространение получил арсенид галлия $AsGa$. Все транзисторы на основе материалов типа $A^{III}B^V$ имеют большее значение T_{max} , чем Ge , Si и др., могут работать при комнатной температуре без дополнительных устройств охлаждения, но только арсенид галлия обеспечивает более высокую максимальную рабочую частоту благодаря высокому значению подвижности и малому времени жизни основных носителей заряда. Еще большей максимальной рабочей частотой обладают $InSb$, $InAs$, но эти материалы при работе требуют глубокого охлаждения [6].

Следует также упомянуть, что в последние годы появились новые группы пьезоэлектриков, в частности полимерные и композиционные. Из полимерных пьезоэлектриков наиболее высокими пьезосвойствами обладают полимеры со спонтанной поляризацией с четко выраженными сегнетосвойствами. Так, следует отметить пленку (5 – 50 мкм) поливинилиденфторида с пьезомодулем $d_{33} < 50$ пКл/Н (обычно до 30 пКл/Н) и высокой пьезочувствительностью $g_{3j} < 300$ В·м/Н, обладающую наилучшими пьезо- и пироэлектрическими свойствами, а также сополимер трифторэтилена с винилиденфторидом, имеющий более высокое значение точки Кюри. Пьезополимеры широко применяют в электромеханических и электроакустических преобразователях, микрофонах, громкоговорителях для различных ПЭ большой площади (1 – 100 см²) и т. д. Композиционные пьезоэлектрики, сочетающие в себе ценные свойства пьезокерамики и полимеров с различными типами их связности, имеют повышенные пьезочувствительность, упругую податливость (эластичность) и ударную прочность по сравнению с пьезокерамикой. Пьезокомпозиты – порошковые (порошок сегнетоэлектрика с полимерным связующим), пористая пьезокерамика, пропитанная полимером, стерженьковые и конструкционные (блоки с прорезями, отверстиями и т. п.) – отличаются различными значениями пьезокоэффициентов.

Вообще, пьезокерамика представляет собой поликристаллическую структуру из кристаллитов с сегнетоэлектрическими свойствами. Кристаллиты (зерна) имеют доменную структуру и различную ориентацию кристаллографических осей. Свойства пьезокерамических материалов определяются стехиометрическим составом и зависят от условий изготовления. Изделия из пьезокерамики в промышленности производят обычно из готовых синтезированных материалов. В общей схеме технологических процессов производства пьезокерамических материалов и элементов выделяют три главные стадии по получению пресс-порошка, керамики и элементов [8, 10].

Наиболее эффективно и широко в разнообразных устройствах применяются пьезокерамические материалы двухкомпонентной системы цирконат-титанат свинца $Pb(TiZr)O_3$ или PZT и многокомпонентные системы на ее основе [8]. Составы PZT синтезируются из оксидов различных металлов, основными из которых являются: диоксид титана TiO_2 , оксид свинца PbO , диоксид циркония ZrO_2 . Высокотемпера-

турный синтез твердых растворов осуществляется из промышленного химического сырья или химических реактивов соответствующих марок. Исходные компоненты должны быть химически чистыми с содержанием основного вещества не менее 99,5% (99,8%)[10]; их чистота определяет разброс электрофизических параметров пьезокерамики и степень ее воспроизводимости.

В сравнении с полярными пьезоэлектриками – полимерными и композиционными пьезокерамическими материалами (PZT и др.) – неполярные пьезодиэлектрики и пьезополупроводники (SiO_2 и AsGa) имеют худшие пьезосвойства, т.е. обладают меньшими значениями пьезоэлектрических констант, но благодаря малым механическим и диэлектрическим потерям, высокой механической добротности и слабой зависимости от внешнего влияния (температуры, давления и др.) представляются наиболее пригодными в качестве материала для пьезосорбционных сенсоров. Известно, что в отличие от пьезокерамических материалов, которые, будучи анизотропными, активизируются только под влиянием электромагнитных полей с критическим отбором электрических параметров, имеют довольно сложный закон, описывающий связь электрических параметров и нестабильны (в рабочих интервалах температур, влажности, давления), процессы поляризации и связи аналитического сигнала с концентрацией примеси на поверхности детектора, для SiO_2 и AsGa описываются стабильной, в широком интервале, линейной зависимостью. Нельзя не обращать внимание также на тот факт, что технологические процессы нанесения покрытий и модификации поверхности, намного лучше отработаны и используются значительно шире в случае именно неполярных пьезодиэлектриков и пьезополупроводников и позволяют качественно и дешево нанести большой спектр веществ-адсорбентов (хемосорбентов).

Уравнение (2) учитывает, что коммерчески доступны 15-МГц кварцевые кристаллы, которые имеют электроды 5 мм в диаметре и массовую чувствительность около 2600 Гц на мкг. Поэтому очевидно, что кварцевый кристалл может быть исключительно чувствителен индикатором массы.

В производстве некоторых полупроводниковых приборов, металлы, которые наносят методом испарения или электрохимического осаждения на кварцевые пластины, выполняют роль электродов. Количество размещенного металла откорректировано таким образом, чтобы привести значение частоты к требуемому значению.

Но, металлы и другие твердые вещества тем существеннее влияют на способность кристалла вибрировать, чем более сравнимы их (металлического покрытия и пьезопластины) толщины[10]. Когда на поверхность кварца попадают жидкости, способность к вибрации часто повреждается, так как поверхность вибрирующего кристалла сбрасывает энергию в жидкость. Если газ способен адсорбироваться в жидком покрытии, амплитуда колебаний снова будет уменьшаться. В этом случае амплитуда колебаний может использоваться для детектирования газовых смесей.

Конструкция пьезосорбционного датчика с металлическими омическими контактами имеет определенные недостатки. Во-первых, очевидно, что металлическое покрытие пьезосорбционных сенсоров снижает чувствительность и точность датчика, за счет снижения резонансной частоты, и уменьшения активной (сорбционной) поверхности. Во-вторых, при решении задач анализа агрессивных веществ, металлопокрытия с высокой степенью вероятности реагируют с анализируемой фазой, что влечет погрешность измерения и износ датчика. Безусловно, есть варианты решения этих проблем путем подбора материала металла электродов, стойкого к воздействию

агрессивных сред и температур, изготовления дырчатых электродов, для увеличения активной площади датчика, но все эти меры влекут снижение рабочих параметров, повышение стоимости и снижение надежности детектора.

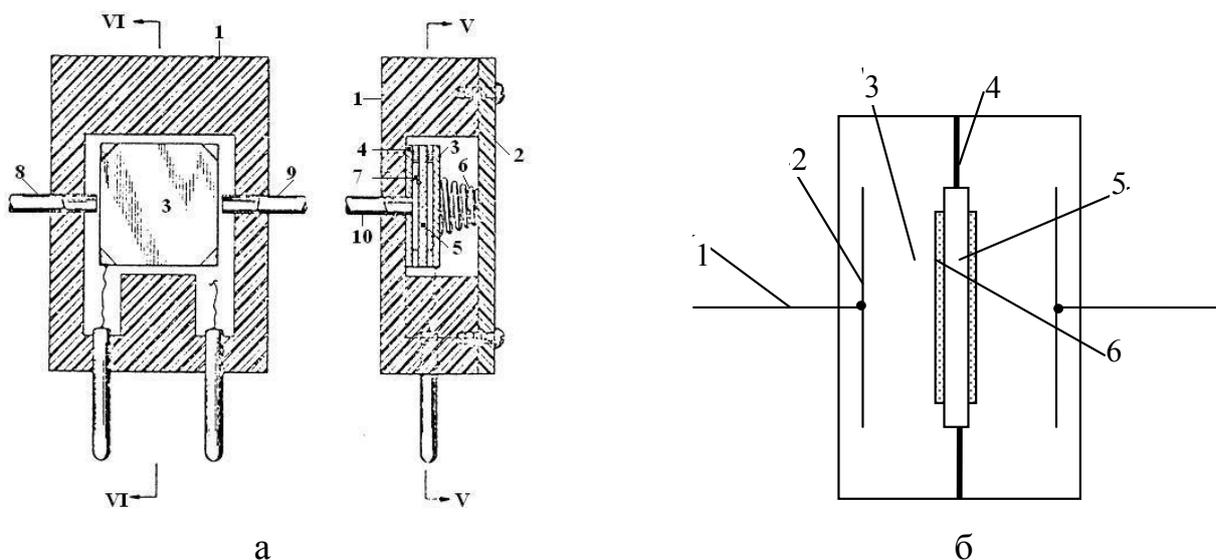


Рис.1. Традиционная и безэлектродная конструкции пьезосорбционных датчиков: а - традиционная конструкция пьезосорбционного датчика с омическими контактами: 1 - бакелитовый кожух, 29×21×11 мм, FT-243; 2 - передняя крышка, закрепленная с помощью винтов; 3 - фронтальный электрод; 4 - хвостовой электрод с 2-мм газовым трубопроводом; 5 - 0,5×0,5×0,02 см кварцевый кристалл (детектор); 6 - подпружиненный прижим; 7 - детекторный объем около 0,02 мл; 8 - хвостовой газовый трубопровод; 9 - фронтальный газовый трубопровод; 10 - фронтальный газовый трубопровод; б - безэлектродная конструкция: 1 - провод к источнику питания; 2 - электрод конденсатора; 3 - детекторный объем; 4 - диэлектрические держатели детектора; 5 - детектор; 6 - чувствительное покрытие.

Таким образом, более рациональной конструкцией пьезосорбционного сенсора представляется безэлектродная конструкция представленная на рис.1б. Такой датчик не имеет омических контактов на рабочем теле, а сигнал передается посредством поля в конденсаторе.

В сравнении с традиционной схемой [9] (рис 1б) в предложенной конструкции отсутствуют омические контакты на самом кварцевом кристалле. Сенсор с чувствительным покрытием жестко закреплен на диэлектрических держателях в конденсаторе, диэлектриком в котором, является анализируемый газ. Рабочая частота и полезный сигнал передается посредством электрического поля через электроды конденсатора.

Известные электрические схемы такого типа позволяют передавать частоту заряда-разряда конденсатора порядка десятков ГГц с использованием полевых транзисторов в пульсирующем режим с сильной отрицательной обратной связью. Очевидно, что во избежание негативного влияния на работу датчика необходимо снижать индуктивность контура, что достигается путем подбора RC-цепочки и подавать на систему достаточно большую мощность. Ожидаемое нагрузочное сопротивление контура порядка 10 МОм.

Таким образом, безэлектродная конструкция позволит улучшить такие рабочие характеристики пьезосорбционных датчиков, как чувствительность, точность измерения и технологичность изготовления, а также расширит сферу применения таких систем.

Важним моментом, для расширения ассортимента определяемых ТВ представляется изучение кинетики лимитирующих стадий процесса определения газообразных веществ в воздухе в зависимости от адсорбента и способа его нанесения, а также процессов сорбции в электрическом поле.

Литература: 1. Другов Ю.С., Беликов А.Б., Дьякова Г.А., Тульчинский В.М. Методы анализа загрязнений воздуха. – М.: Химия, 1984.– 384 с. 2. Рудых И.А., Кораблев И.В., Иващенко В.Е. Сорбционно–частотные датчики для контроля состава газов. – М.: Машиностроение, 1989. – 226 с. 3. Guilbault G.G., Luong J.H.T., Prusak–Sochacze // Biotechnology.– 1989.– Vol. 7–P.–349. 4. Блажеєвський М.Є., Баталов А.І., Петров С.І. та ін. Технічні засоби індикації отруйних речовин. – Х.:ХІТВ, 2003. – 160 с. 5. Павленко В.А. Газоанализаторы. – М.-Л.: Машиностроение, 1965. – 332 с. 6. Полупроводниковая электроника: Справочник / Баранский П.И., Ключков В.П., Потыкевич И.В. – К.: Наукова думка, 1975. – 704 с. 7. Lital Alfonta, Eugeni Katz, and Itamar Willner // Sensing of acetylcholine by a tricomponent – enzyme layered electrode using faradaic impedance spectroscopy, cyclic voltammetry, and microgravimetric quartz crystal microbalance transduction methods. // Anal. Chem. – 2000. – Vol.72. – P.927–935. 8. Ерофеев А.А., Данов Г.А., Фролов В.Н. Пьезокерамические трансформаторы и их применение в электронике. – М.: Радио и связь, – 1988. – 128 с. 9. William H. King, Jr. Piezoelectric Sorption Detector. / Analytical Chemistry, – 1964, –Vol.36, №3, – P.1735 – 1739 10. Никулин Н.В., Назаров А.С. Радиоматериалы и радиокомпоненты. – М.: Высшая школа, – 1986. – 208 с.

УДК 621.325

ДІЛАТОМЕТРИЧНИЙ МАЛОІНЕРЦІЙНИЙ ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРИ ТЕПЛОНОСІЯ В ТРУБОПРОВІДІ ВЕЛИКОГО ДІАМЕТРА

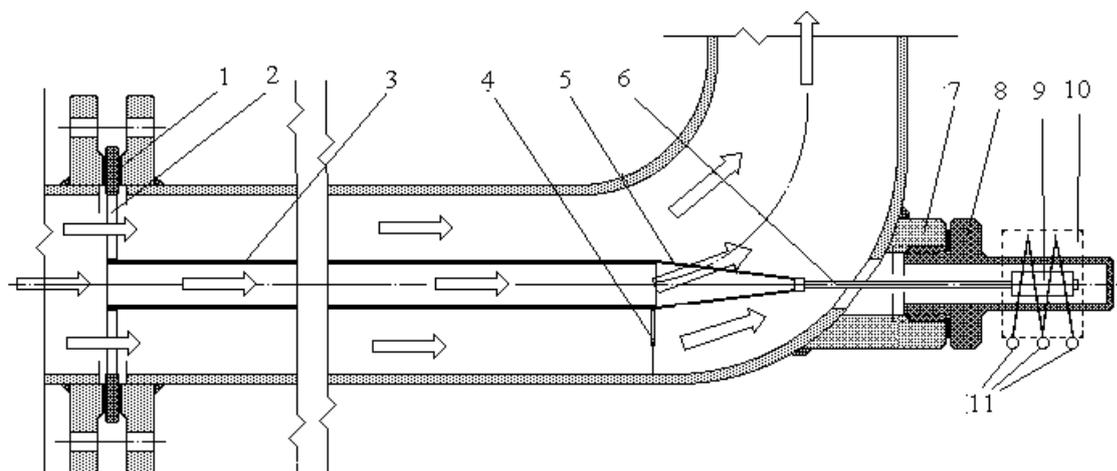
Воїнова С. О., канд. техн. наук, **Воїнов О. П.**, докт. техн. наук (м. Одеса, Україна)

It's offered and created the senting element of temperature with a low inertia.

В системах управління технічними об'єктами широко застосовують датчики температури. Їх важливою характеристикою є інерційність.

Відомі ділатометричні датчики температури контактують з контрольованим середовищем однією зі сторін (зовнішньою або внутрішньою) свого корпусу. Це робить великою їхню сталю часу, чим обмежує сферу доцільного застосування.

Ділатометричний датчик температури середовища (яке протікає по трубопроводу), з малою сталою часу, являє собою відрізок тонкостінної металеві труби 3, встановлений у трубопроводі співосно (рис.). Базовий (нерухомий) кінець труби датчика за допомогою розчалювань 2 жорстко прикріплений до вставки 1 у фланцевому роз'ємі трубопроводу. Рухливий кінець за допомогою тяг 5 прикріплений до повідця



6, що несе плунжер 9 індуктивного перетворювача 10. Фланець трубопроводу і корпус перетворювача 10 закріплені на загальній твердій базі. Клеми 11 перетворювача й обмотки живильного трансформатора з'єднують у міст. З його вимірювальної діагоналі знімають сигнал (напругу), розмір якого відбиває рівень температури контрольованого середовища. Якщо міст урівноважений при заданому значенні температури, то про напрямок і розмір її зміни можна судити по фазі і рівню сигналу, що надходить від моста.

Рухливий кінець труби датчика (консоль) спирається на поверхню трубопроводу за допомогою еластичної опори 4, що забезпечує плавне його (кінця труби) переміщення. Штуцер 7 і втулка 8 із трубкою з немагнітного металу дозволяють герметизувати утворений ними вузол і здійснити виведення сигналу з порожнини трубопроводу. Якщо перетворювач 10 закріпити на втулці 8, то сигнал датчика буде пропорційний швидкості зміни температури контрольованого середовища.

В описаному датчику, завдяки малій товщині стінки його труби і двосторонньому обтіканню її контрольованим середовищем, сталу часу можна зробити дуже малою. Діаметр труби доцільно вибрати з умови рівності швидкостей обтікання її середовищем зсередини і зовні (у кільцевому каналі). Реалізований натурний датчик показав сприятливі технологічні й експлуатаційні властивості. Датчик доцільно застосувати в САУ для контролю температури краплинних і некраплинних рідких середовищ, суспензій у будь-яких умовах, а також сипучих тіл, пневмо- чи гідрозріджених дрібнозернистих засипок, що рухаються самопливом по круто нахилених трубопроводах із заповненням перерізом. Подібні датчики температури дозволяють покращити динамічні характеристики САУ в станційній і промисловій енергетиці.

УДК 621.18:66.096.5

МОЖЛИВОСТІ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ ХАРАКТЕРИСТИКОЮ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Воїнова С. О., канд. техн. наук. (Одеса, Україна)

It's set the conception of the control by technical objects on the basis of restriction of their influence on an environment.

Системи автоматичного управління (САУ) технічними об'єктами (ТО) традиційно вирішують, в основному, задачу підтримки на заданому рівні параметрів технологічного процесу, які впливають на надійність і/чи на економічну ефективність функціонування цих об'єктів. При цьому, їхня екологічна ефективність (ЕЕ) складається стихійно й у більшості випадків виявляється вкрай несприятливою для природного середовища. Результатом цього є наслідки антропогенного руйнівного діяння на природне середовище. Вони все частіше здобувають необоротний характер. Подібна традиційна концепція управління ТО в умовах прискореного розвитку виробництва, і відповідного збільшення обсягу шкідливого впливу на природу, неспроможна. Тому сформувалася проблема, необхідність розробки нової концепції, орієнтованої на радикальне зменшення діяння ТО на природне середовище.

Відповідно до неї, необхідно прийняти рівень ЕЕ ТО як головний технологічний параметр їх функціонування, котрим слід управляти. При цьому, зберегти, якщо необхідно, управління іншими істотними параметрами технологічного процесу, але як додатковими, що дозволяють підтримувати параметри цього процесу в межах прийнятого його регламенту.

ЕЕ ТО – комплексна властивість. Управляти слід одним з формуючих її показників. Вибір його – відповідальна і складна задача. У кожному випадку цей показник предстает фактором, що є найбільш агресивним, небезпечним для природного середовища з числа діючих. При оцінці агресивності як об'єкт впливу варто вибирати не тільки людину, але і представників флори і фауни в районі розташування ТО. Вони, найчастіше, найбільш уразливі для шкідливого діяння.

Рішення зазначених задач ускладнюється низкою обставин, зокрема такими:

- недостатньо вивчено механізм, силу і динаміку шкідливого діяння різних факторів на об'єкти живої природи, у тому числі – ланцюжків опосередкованого їхнього впливу на біосферу;
- мало вивчено вплив інтенсивності дії кожного фактора на характер і ступінь збитку, заподіяного живій природі;
- накопичено мало даних про кількісну сторону впливу, про механізм і силу спільної дії двох чи декількох факторів, недостатньо розвинено методичну й інструментальну базу для оперативного контролю сили впливу факторів і контролю за його наслідками;
- діє психологічний бар'єр на шляху відмовлення від колишньої і переходу до нової концепції (прямого управління рівнем ЕЕ ТО).

Варто звернути увагу на те, що підвищення економічної ефективності ТО, як правило, супроводжуване відповідним скороченням витрат енергії і сировини на виробництво одиниці продукції, обумовлює підвищення ЕЕ цих об'єктів.

У зв'язку з викладеним, рішення розглянутої проблеми полегшується тим, що в ТО традиційні САУ економічною ефективністю технологічного процесу варто залишити в дії, але як другорядних за важливістю. Іншим САУ, можливо, прийдеться додати той самий статус, залишити існуючий чи оновити. Доцільним є традиційні САУ об'єднати в комплексну систему з розширеними функціональними можливостями. Пріоритет повинний належати САУ ЕЕ [1, 2].

Для рішення розглянутих задач доцільним є застосування досконалих САУ, з підвищеним інтелектуальним рівнем їхніх алгоритмів, спроможних реалізувати гарантоване управління технологічними процесами високої розмірності. Створення подібних систем повинно бути проблемно орієнтованим на напрямок і перспективу розвитку галузі застосування [1, 2].

Відзначимо, що управління ЕЕ ТО – важлива задача не тільки в сфері застосування сучасного високо ефективного технологічного устаткування, але й у сфері використання устаткування старого, що відробило розрахунковий ресурс. У останнього, як правило, ЕЕ є неприпустимо низькою [3, 4].

Використання ідеї управління ЕЕ становить особливий інтерес у галузях виробництва, високо відповідальних за збиток, що заподіяно природному середовищу. Це відноситься, насамперед, до теплоенергетики. Котельні установки, які застосовують в станційній і промисловій енергетиці, а також на кожному промисловому підприємстві, впливають на живу природу. Вони, зокрема, викидають і скидають у навколишнє середовище шкідливі речовину і теплоту. У котельнях додають багато зусиль для підтримки високої економічності устаткування. Перенос уваги і зусиль на управління ЕЕ здатний принести в цій важливій галузі народного господарства великий екологічний ефект.

При спалюванні в котлах сірчастого палива оксиди сірки (SO_2 і SO_3) – SO_y , що створилися в топках, – надходять в атмосферу, негативно впливають на природне

середовище. Традиційні САУ процесом горіння в топці не роблять прямого впливу на викид SO_y . Як приклад наводимо запропоноване рішення питання щодо управління викидом цих оксидів.

У котлах процесом горіння традиційно управляють за допомогою регулятора (Р, рис.) повітря (економічності) і регулятора палива (теплого навантаження). Перший управляє подачею в топку дуттєвого повітря. Він працює за сигналом “витрата пари”, сигналом від регулятора палива і сигналом зворотного зв'язку по кількості подаваного повітря. Регулятор палива управляє його подачею і працює за сигналом “тиск пари поза котлом” і сигналом зворотного зв'язку по витратам палива чи по положенню регулюючого органа (РО) на його потоці.

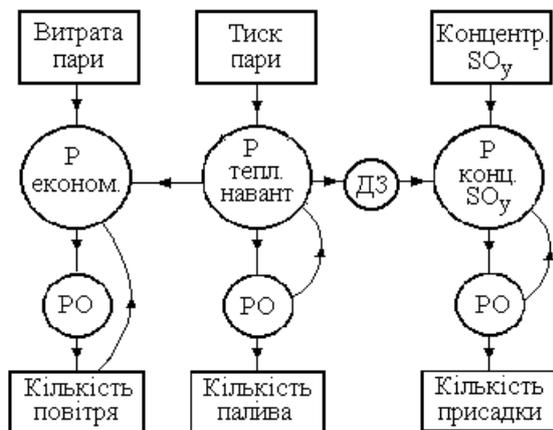


Рис. Схема САУ тепловим навантаженням котла, співвідношенням "пара-повітря" та концентрацією SO_y в газах за топкою

Для додання САУ функцій управління ЕЕ котла (по викиду SO_y), необхідно застосувати додатковий, новий контур управління – регулятор концентрації SO_y у топкових газах (рис.). Він повинен підтримувати SO_y у заданому вузькому діапазоні значень, які у

прийняте для даної котельно-топкової технології число разів нижче за гранично допустимі (нормативну) концентрацію (ГПК) цього оксиду. Тим самим регулятор підтримує заданий максимальний рівень ЕЕ котла по викиду SO_y .

Працює регулятор за сигналом “ SO_y ” Для зменшення динамічної помилки, на нього подають також сигнал динамічного (зникаючого в статиці) зв'язку (ДЗ) від регулятора теплового навантаження (рис.). Управляє регулятор потоком твердої сипучої присадки, що містить CaO чи MgO (наприклад, розмеленого вапняку), яка вводиться разом з паливом у топку. Присадка в процесі горіння палива хімічно зв'язує оксиди сірки у тверді продукти, що видаляються з топки з золою.

Приклад ілюструє доступність прямого управління ЕЕ котельно-топкових систем. Однак, для цього необхідно мати датчики фізичних величин, що відбивають рівень агресивності джерела шкідливості (у нашому прикладі – датчики концентрації SO_y у газах) і працюють у реальному масштабі часу. Подібні прилади нині є дефіцитними. Розробка і розвиток їхнього виробництва є невідкладною науково-технічною задачею.

Література: 1. Хобин В. А., Воинова С. А., Левинский В. М., Плева А. Г. Совершенствование алгоритмического и технического обеспечения систем управления технологическими агрегатами АПК // Тез. докл. Всесоюзн. Науч.-техн. конф. “Системы управления и средства автоматизации в агропромышленном комплексе”. (Кишинев, 1987). – М., 1987. – С. 115–116. 2. Хобин В. А. Функциональная структура современных САУ технологических агрегатов и место в ней функции гарантирования // Матер. Між нар. конф. з управління. “Автоматика 2001”. (10-14 вересня 2001, Одеса). – Одеса, ОДПУ, 2001. Т.І. С.121–122. 3. Воинова С. А. Особенности управления техническими объектами с небольшим остаточным ресурсом. // Матер. Міжнар. конф. з управління “Автоматика 2001”. (10-14 вересня 2001 р., Одеса). – Одеса, ОДПУ, 2001. Т.І, с.143–144. 4. Воинова С. А. Влияние длительности функционирования технических объектов на их технологическую эффективность. // 3б матер.5-ої Міжнар. наук-практ. конф. “Управління ефективним енерговикористанням”. (4-5 вер. 2003 р., Одеса). Одеса, ТЕС. 2003. С. 89-90.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА ПЛАСТМАСС С ЭЛЕМЕНТАМИ САМОКОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Исаков С.Н. (г. Харьков, Украина)

The new method for designing of plastic welding ultrasonic systems with elements for self-controlling and technologic process managing are proposed. Self-controlling and managing systems are formed on the base of active elements - sensors and actuators, MEMS elements, as well as special software.

В настоящее время изделия из пластмасс прочно вошли в нашу жизнь и сферы их использования постоянно расширяются, постоянно расширяется спектр новых материалов. Одним из эффективных способов монтажа изделий из пластмасс является ультразвуковая сварка, широко применяемая в различных технологических процессах. При этом на качество сварного шва или узла накладываются достаточно жесткие требования, которые необходимо выдержать в процессе сборки.

Среди основных требований к качеству сварного шва можно выделить следующие:

- допуск по ширине шва или зоны сварки;
- прочность сварного соединения на разрыв;
- стойкость шва к перегибам;
- минимальный диаметр перегиба до разрушения в месте сварки;
- уменьшение прочности сварного соединения с течением времени.

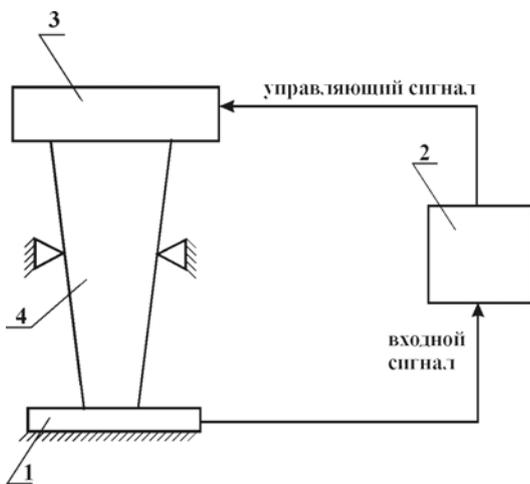


Рис. 1. Принципиальная схема установки.

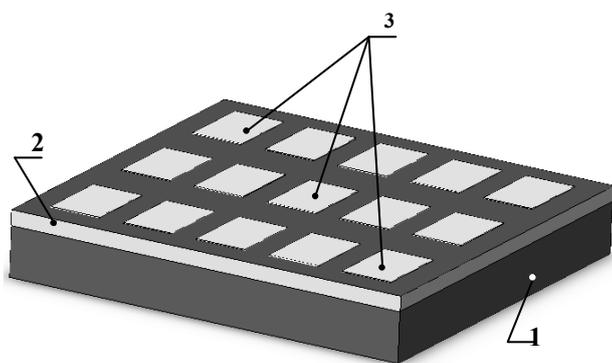


Рис. 2. Сенсорный блок.

Для обеспечения эффективного процесса соединения была разработана система самоконтроля и управления. Система позволяет контролировать равномерность сварочного усилия в зоне сварки во время технологического процесса за счет использования специализированного сенсорного блока, связанного посредством анализатора с блоком коррективы ультразвуковой сварочной головки.

Принципиальная схема системы представлена на рис. 1. Контрольные сигналы от сенсорного блока 1 поступают на анализатор 2, где происходит формирование управляющего сигнала на блок приводов 3 коррективы положения ультразвуковой сварочной головки 4.

Сенсорный блок рис.2 представляет собой многослойную пластинчатую конструкцию, состоящую из подложки 1, активного слоя 2 и внешнего электрода 3. внешний электрод имеет ячеистую структуру, при этом характерный размер ячейки зависит от размера зоны сварки. При деформировании активного слоя вследствие пьезоэлектрического эффекта в каждой ячейке формируется электрический сигнал, соответствующий

сварочному усилию в данном месте. После обработки поступающих сигналов и сравнения их с эталонным значением формируется управляющий сигнал, передаваемый на блок приводов.

Активный слой сенсорного блока формируется с использованием технологии микродугового оксидирования (МДО). Технология микро дугового оксидирования [1] базируется на формировании микро дуговых разрядов на поверхностях элементов и деталей, погруженных в щелочной электролитический раствор. Это позволяет формировать многофункциональные покрытия с уникальным комплексом физических и механических свойств [2]. Используя в электролите различные химические добавки, можно формировать МДО покрытия с дополнительными функциональными свойствами [3]. Добавляя в электролит в виде мелкодисперсной эмульсии пьезоактивный материал, который в процессе оксидирования внедряется в структуру покрытия, после соответствующей поляризации покрытия, существенно повышаем пьезоэлектрические свойства покрытия при сохранении его износостойкости, хорошей адгезии с основой, твердости и прочего. Этот процесс лежит в основе создания эффективной конструкции сенсорного блока. В то же время, использование технологии МЭМС открывает новые возможности для создания новых конструкций активных систем с широким спектром их применения.

Ультразвуковая сварочная головка представляет собой резонансную колебательную систему, состоящую из активных и пассивных элементов, динамический расчет которой осуществлялся методом конечных элементов с использованием специализированных объемных двадцати узловых изопараметрических конечных элементов [4, 5]. При этом для областей пассивных материалов используются 20-ти узловые изопараметрические КЭ с 3-мя степенями свободы в узле, а для областей активных материалов – с 4-мя степенями свободы в узле. В качестве четвертой степени свободы выступает значение потенциала электрического поля.

Твердотельная модель сварочной головки моделировалась с использованием системы Solidworks и представлена на рис. 3, рабочая резонансная частота 22 кГц.

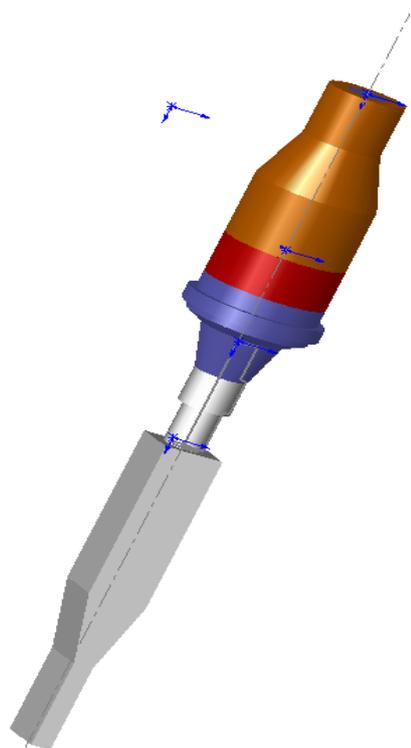


Рис. 3. Модель сварочной головки.

Блок корректировки положения ультразвуковой головки состоит из двух линейных актуаторов и одного привода вращения. При этом линейные актуаторы управляют положением оси сварочной головки, а привод вращения – положением рабочего торца относительно оси сварного шва. В установке можно использовать серийно выпускаемые актуаторы и приводы.

Импульсы, формируемые сенсорным блоком, обрабатываются анализатором в режиме реального времени с использованием выбранной стратегии управления системой для обеспечения требуемых параметров сварного шва. При этом выбранная стратегия управления обеспечивает формирование качественного равномерного сварного шва по всей ширине микрофильма компенсируя исходную неоднородность физикомеханических и геометрических параметров пленки.

Разработанная система позволит эффективно осуществлять сварку различных изделий.

Дальнейшие исследования в этой области будут направлены на миниатюризацию блока анализатора за счет применения технологии МЭМС, что позволит интегрировать блок анализатора в корпус сварочной головки для создания компактных установок простых и надежных в эксплуатации.

Литература: 1. Николаев А.В., Марков Г.А. и др. Новый феномен в электролизе// Изд. АН СССР Химические науки. 1977, Т.5, № 12, с.32-34. 2. Белозеров В.В. Структура и свойства МДО покрытий на деформируемых алюминиевых сплавах// Физическая металлургия и обработка металлов, 1999, N 4, с. 46-50. 3. Isakov S.N. MAO Technology of New Active Elements Reception// Proceedings of IUTAM Symposium on Smart Structures and Structronic Systems, DFG & KAP, Magdeburg, 2000, p. 121-128. 4. Isakov S. Adaptive Structures Optimization // Modelling and Control of Adaptive Mechanical Structures - Fortschr. -Ber. VDI Reihe 11 Nr. 268. Duesseldorf: VDI Verlag 1998, pp. 249-256. 5. Isakov S., Kedrovskaya O. Designing of ultrasonic waveguides in conditions of spatial oscillations, MicroCAD'99 " Information technologies: Science, Technique, Technology, Education, Health ", issue 7, part 1, 1999. p.293-299.

УДК 539.3

ПРОЧНОСТНОЙ АНАЛИЗ КРЫШКИ КОРПУСА ДАТЧИКА ГАЗА

Бондарь С.В., Автономова Л.В. (г. Харьков, Украина)

Work is devoted to consideration of problem of durability of element of construction of sensor of gas. The calculations of dependence of the stress-deformed state of lid of corps from the radius of curvature of fixing of lid with base were conducted.

Технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) охватывают широкий спектр основных наук и отраслей производства и представляют собой мультидисциплинарную группу, включая физику, химию и химическую науки, а также механическую, электрическую и электронные отрасли.

Достижения в области материаловедения и специальных технологий создания новых материалов позволили предложить для использования в области МЭМС особые материалы типа кварца, кремния, силикона, полисиликона и их модификаций. Применение данных материалов привело к созданию нового направления в развитии сложных мини и микроэлектромеханических систем, которые применяются в аэрокосмической, микробиологической, медицинской, автомобильной, компьютерной и других областях.

Одно из направлений развития МЭМС – это создание миниатюрных устройств, которые изменяют физические параметры вследствие действия электрического сигнала, зависящего от механической структуры или параметров их функционального назначения. Такие системы состоят из электрических и механических элементов, которые интегрируются в единое устройство с использованием современных высоких технологий.

В МЭМС применяются разнообразные акселерометры, датчики давления, микроклапаны, гироскопы и другие сенсоры и актуаторы. Такие системы имеют сенсорные, контролируемые и актуаторные особенности на микроуровне и функционируют индивидуально или совместно, что приводит к необходимому эффекту на макроуровне.

Не смотря на то, что в производстве МЭМС относительно дешевы, на их разработку приходится тратить значительные средства, в связи с необходимостью прове-

дения многочисленных опытов с прототипами их элементов. На стадии проектирования к МЭМС предъявляется большое число зачастую весьма противоречивых эксплуатационных и конструктивных требований.

С точки зрения структурной механики исследовательские работы имеют в основном экспериментальный характер испытания конструкций, которые имеют сенсорные и актуаторные особенности.

Внедрение современных методов проектирования и расчета на этапе проектирования позволяет значительно снизить затраты на разработку МЭМС, и тем самым сделать эти системы более доступными.

При проведении прочностного анализа МЭМС необходимо внимательно проанализировать среду, в которой предстоит работать рассматриваемой системе и правильно определить нагрузки которые действуют на нее. Выявление связанности нагружения имеет большое значение, т.к. МЭМС системы, в связи со своими малыми размерами, подвержены действию не только статических и динамических сил, но и тепловому и электростатическому. В некоторых элементах МЭМС тепловые нагрузки являются основными и могут приводить к «срабатыванию» элементов.

Отличительной характеристикой МЭМС объектов является их маленькие размеры, что должно находить отражение при построении расчетных схем. Учитывая то, что относительные размеры таких устройств в разных направлениях все же имеют один порядок, необходимо рассматривать их как трехмерные.

Одно из направлений развития МЭМС является создание датчиков газа для экологического контроля атмосферы. Их действие основано на реагировании определенных материалов, как например SnO_2 или ZnO , при высоких температурах с определенными атмосферными газами, которые изменяют их электрическую проводимость. Основными требованиями к таким датчикам, выдерживающим высокую нагрузку, является высокая чувствительность, низкое энергетическое потребление и простой, недорогой процесс производства.

Одним из элементов конструкции резистивного датчика газа является корпусная крышка, под которой находятся нагреватели, расположенные на толстой квадратной многослойной анизотропной мембране 1~3

миллиметров, обеспечивающие в активной области датчика высокую температуру до 580 К. При таком температурном режиме работы необходим детальный прочностной анализ микроэлемента – крышки корпуса, которая препятствует проникновению пыли и влаги к чипу, и защищает его от механических повреждений. С одной стороны корпусная крышка данного МЭМС должна быть минимальной по размеру, а с другой стороны должна выполнять функции, возложенные на нее и воспринимать нагрузку приложенную к ней как изнутри (тепловая) так и снаружи (механическое воздействие).

Герметичная корпусная крышка, представляющая собой оболочечную структуру, может иметь различную конфигурацию. Возможная разгерметизация корпуса, возникающая при повышении рабочей температуры под крышкой, вследствие измене-

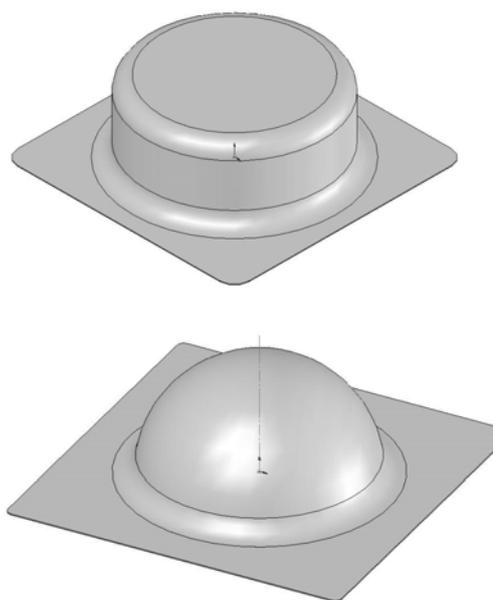


Рис.1. Типичные виды крышек с подложкой.

ния прочностных характеристик, может привести к разрушению корпусной крышки и выводу датчика газа из строя.

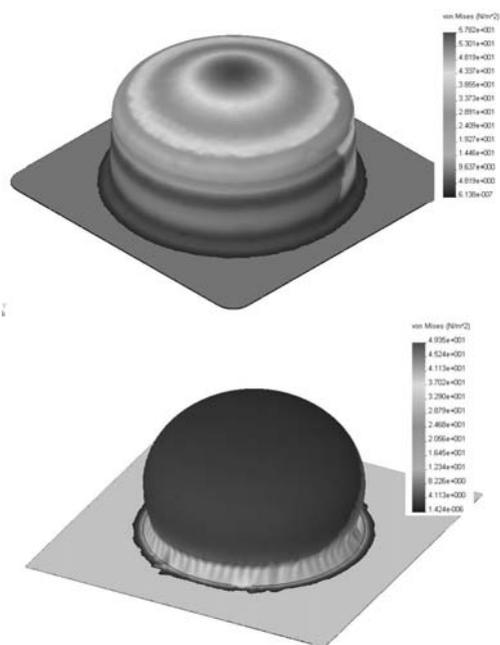


Рис.2 Распределение интенсивности напряжений.

места соединений крышки с подложкой. Данные места представляют собой концентраторы напряжения и при производстве необходимо изготавливать их более плавными.

Численный эксперимент позволил подобрать в заданном диапазоне габаритных размеров оптимальный радиус кривизны крышки и радиус кривизну крышки в месте крепления ее к подложке, что представляется затруднительным выполнить экспериментально.

На рис.3 приведено распределение напряжения в модифицированной крышке. Результаты анализа показали, что правильный подбор кривизны позволяет снизить напряжения в 2 раза.

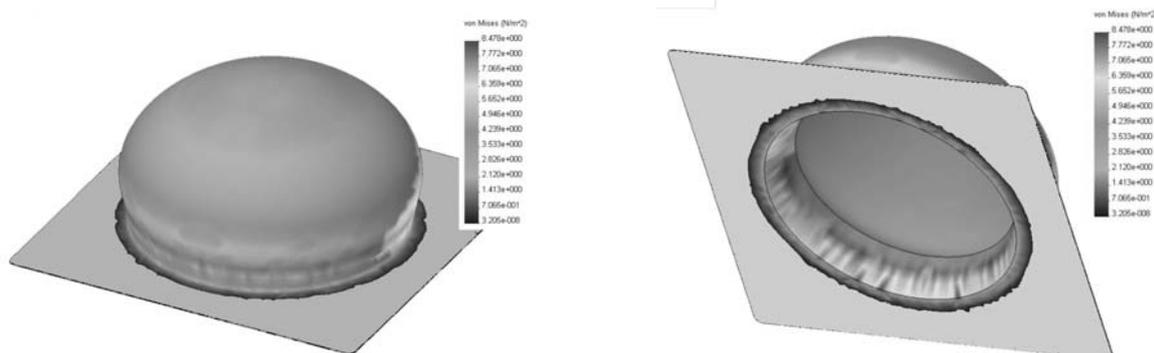


Рис.3. Распределение интенсивности напряжений в модифицированной крышке.

На примере вышеизложенного численного прочностного анализа крышек датчика газа MEMC можно отметить, что дальнейшее эффективное развитие микротехники и микротехнологий невозможно без применения надежных систем численного моделирования, многофункционального анализа, тестирования.

Литература: 1. Автономова Л.В., Степук А.В. Технологія створення та головні проблеми мікроелектромеханічних систем MEMC. "Фізичні та комп'ютерні технології в народному господарстві", 2002р., с.661-665.

**СТВОРЕННЯ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ – ПЕРСПЕКТИВА ТЕХНОЛОГІЧНОГО
ООНОВЛЕННЯ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ**

Невлюдов І.Ш., докт.техн. наук, **Яшков І.О.**, канд.техн. наук, **Яшков О.В.**,
Коротецький В.І. (м.Харків, Україна)

The given -work is devoted to the modern developments in the field of the new materials for production of the electronic apparatus.

Особливе значення для технологічного оновлення виробництва електронних апаратів в майбутньому має створення та використання в ньому нових речовин і матеріалів.

Серед технологічних засобів створення нових речовин та матеріалів останніми роками високого рейтингу набувають нанотехнології, що є засобом конструювання об'єктів з молекулярною точністю, корінних змін у виробництві, значного поліпшення властивостей матеріалів та підвищення продуктивності електронних апаратів, приладів і обладнання. В цих дослідженнях займає певне місце і Україна. На основі нанотехнології створюються матеріали високої міцності та якості. Так, вперше за допомогою методів нанотехнології порошкових матеріалів отримано дрібнозернистий спечений титанат барію з відносною щільністю 99,9 % та розміром зерен 0,3 мкм. Досягнуті параметри нового матеріалу роблять таку кераміку перспективною для мініатюризації багат шарових конденсаторів.

Завдяки формуванню специфічної графітоподібної наноструктури доведена можливість реалізації надвисокої твердості вуглецевих плівок, що має бути перспективним матеріалом для застосування їх у третьових вузлах записуючої та зчитуючої апаратури.

Пріоритетними та перспективними є розробки вчених України, спрямовані на створення нового типу напівпровідникових скінтіляторів для швидкодіючих рентгенівських інтроскопів, томографів, дозиметрів з великим дозовим навантаженням.

Протягом останніх років в Україні створювались принципово нові функціональні матеріали для розвитку електроніки, напівпровідникові матеріали, опто -, мікроелектроніка, що забезпечують перехід від мікро- до наноелектроніки, матеріали для силової електроніки, скінтіляційні та конструкторські оптичні матеріали. В процесі розвитку хімічних наук розроблені нові способи одержання нанокмполімерів на основі електропровідних полімерів, доказана можливість електрохімічного одержання матричних електропровідних полімерних антикорозійних покриттів. Взагалі конструкційні та композитні матеріали поступово завойовують домінуючу роль у матеріальному забезпеченні виробництва.

Так вітчизняними вченими, вперше розроблені конструкційні матеріали на основі міді та молібдену, а також промислова технологія їх виготовлення з використанням високошвидкісного методу, електронно-промислового випаровування. Ці матеріали замінюють срібловміщуючі контакти, а отже дозволяють економити такий кошовний матеріал як срібло. За спеціальною програмою розроблено серію конкурентоспроможних термомагнітних матеріалів з підвищеним рівнем тепло-фізичних і експлуатаційних властивостей, що забезпечить: зменшення імпортозалежності від інших країн, технологічну незалежність України, підвищення конкурентоспроможності держави на світовому ринку матеріалів.

Вважається, що базовим матеріальним елементом економіки в майбутньому бу-

де алюміній. Застосування нових технологічних засобів модифікування скандієвих сплавів на основі алюмінію сприятиме зменшенню залежності України від імпорту стратегічно важливої металопродукції. Реалізація відповідних проектів у виробництві дасть змогу одержати значний ефект за рахунок економії валютних коштів, створення можливостей для виготовлення нового покоління наукоємної техніки, раціонального використання цінної сировини, створення експортного потенціалу держави.

Для подальшого економічного зростання країни та її оновлення велике значення має використання результатів вітчизняних наукових досліджень, присвячених розробці багатьох дефіцитних імпортозамінюючих речовин і матеріалів. Так, Україна має високий потенціал щодо створення органічних люмінесцентних матеріалів багатогалузевого використання з новими функціями, більш досконалою технологією виготовлення із застосуванням доступної сировини.

Не менш актуальною є реалізація програми виготовлення базальтових волокон, тканин та композитів на їхній основі. Застосування цих матеріалів дозволить створити багатотоннажне виробництво базальтових неперервних волокон та виробів з них, за допомогою яких може бути ліквідовано дефіцит в Україні деревини, металу, скловолокна, а також повністю замінено канцерогенний азбест. Рівень рентабельності цих перспективних досліджень досягає 90 %, щорічний чистий прибуток становитиме не менше 40 % від виробничих витрат.

Значний ефект в перспективі можна досягти на основі оновлення технології виробництва титану та його сплавів. Використання титану, виробленого на основі такої технології дасть змогу замінити нержавіючу сталь більш як в шестистах агресивних середовищах та одержати щорічну економію в розмірі 50 - 100 тисяч гривень. Широкого розвитку набувають дослідження інноваційного характеру, присвячені створенню полімерних та керамічних матеріалів.

Визначені перспективи щодо застосування у виробництві мають створені в Україні нові матеріали для наплавлення та для різноманіття теплозахисних, зміцнюючих, антикорозійних, жаростійких, зносостійких покриттів, їх використання дозволяє підвищити ресурс роботи устаткування в різних галузях економіки в 5 - 20 разів, знизити витрати на сировину на 20 - 30 %, підвищити стійкість енергетичного і металургійного обладнання в 1,2 - 1,5 рази, зменшити витрати пального на 15-20 %, а в результаті значно знизити матеріалоємність та енергоємність продукції.

Створення високоякісних, термостійких та високоміцних матеріалів є важливою технічною передумовою виготовлення нової конкурентоспроможної продукції, що пропонується для серійного виробництва та продажу на зовнішніх і внутрішньому ринках.

Розробка та впровадження нових біотехнологій дозволили вченим здійснити синтез нового покоління імуносупресорів з високою активністю. Практична відсутність токсичних ефектів зумовлює їх придатність при трансплантації тканин та органів.

Література: 1. Невлюдов І.Ш., Яшков І.О., Яшков О.В. Матеріали й основи технології біотехнічних і медичних апаратів та систем (частина 1): Навчальний посібник. Харків: ХНУРЕ, 2005. 240 с. 2. Александрова В.П. Перспективи технологічного розвитку України // Інноваційні технології. 2003. №2-3.

3. ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 658.7

СТРАТЕГИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫМ РАЗВИТИЕМ ПРЕДПРИЯТИЯ

Гринева В.Н., докт. экон. наук, **Гринев А.В.**, докт. экон. наук
(г. Харьков, Украина)

Strategic management of innovational development of the enterprise.

Одной из важнейших задач отечественной экономики в современных условиях является интеграция Украины в мировое экономическое пространство на партнерских началах.

Кризисная ситуация в научно-инновационной сфере обуславливает необходимость разработки стратегии инновационного развития. Обследование промышленных предприятий г. Харькова и Харьковской области свидетельствуют о том, что среди основных причин, которые сдерживают их развитие, являются: недостаточное финансирование (89-90% опрошенных), отсутствие государственной поддержки (47-52%), высокие налоговые ставки (43-45%), нестабильность законодательной базы (27-29%) и др.

Разработка стратегии инновационного развития предприятия включает: обоснование стратегических заданий, оценку возможностей и ресурсов для их решения, анализ состояния научно-инновационной сферы, определение показателей, которые влияют на результаты инновационной деятельности предприятий. При этом необходимо исходить из того, что инновационная деятельность предприятия представляет собой сложный и многоплановый процесс, включающий экономические, технологические, организационные, социально-психологические и экологические факторы производства. В процессе ее осуществления реализуется много функций, связанных с подготовкой, освоением, выпуском новой продукции с использованием нововведений и выходом с нею на рынок.

На современных мировых рынках изменяются конкурентные условия, приводящие к получению динамично изменяющихся конкурентных преимуществ, которые базируются на нововведениях, инновациях, используемых на всех стадиях производственного процесса. Это способствует созданию конкурентоспособного производства высокотехнологичной продукции, основывающегося на перенесении преимуществ не за счет затрат производства, а за счет качества и новизны продукции. Это предполагает необходимость разработки именно конкурентоспособной продукции инновационного предприятия. В основе концепции такого развития возрастает роль человеческого фактора в процессе производственной деятельности.

В современных условиях существует объективная необходимость перехода от экономики товара к экономике знаний, что обусловлено возрастанием роли человеческого интеллекта как производительной силы глобального масштаба. Экономика знаний базируется на учете интеллектуального и человеческого капитала, синтез которых способствует генерированию и использованию знаний на промышленных предприятиях. При этом появляется реальная возможность радикальных изменений в технике, технологии, организации производства и управлении деятельностью предприятия. Развитие науки на базе использования интеллекта и

принципов гуманизма в экономической литературе получило название «ноосферизации» - в переводе с греческого - «разум». Такой подход свидетельствует о необходимости использования таких новых факторов экономического роста как: развитие современных информационных технологий на базе компьютерной техники; инвестирование образования; обеспечение возможности доступа предприятий к венчурному капиталу; увеличение расходов на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок (НИОКР): наличие необходимого количества и качества человеческих ресурсов, занятых в отраслях знаний; открытость экономики, ее социальная направленность и др. При этом следует отметить, что развитие человеческого интеллектуального капитала является ключевой составляющей стратегии конкурентоспособности в экономике знаний. Кроме того, инвестиции в образование и науку следует рассматривать как средство поддержания и развития интеллектуального капитала, направленного на создание стоимости путем генерирования знаний.

В условиях инновационно-структурной перестройки экономики важная роль отводится созданию стратегии конкурентоспособности страны, промышленных предприятий на основе глобальной экономики знаний. Такая конкурентоспособность обеспечивается знаниями, полученными высокообразованной, высококвалифицированной рабочей силой с использованием человеческого и интеллектуального капитала. С учетом того факта, что в процессе функционирования и развития предприятие может изменять свое состояние в одном из двух противоположных направлений – совершенства или безопасности, предложена модель инновационного развития предприятия, которая позволяет определять систему имеющихся или потенциальных проблем, возникающих в процессе достижения цели его инновационного развития. Построение этой модели основывается на учете двух видов ресурсов:

- знаний, которые являются неисчерпаемыми и в процессе использования возрастают за счет накопления информации и получения новых знаний;
- времени, которое является невозполнимым, что представляется важным в условиях быстрых изменений, внедрения информационных технологий. В процессе исследования в этой связи необходимо делать выводы относительно инновационного развития в прошлом, настоящем и будущем времени.

В процессе реализации такой модели важное значение приобретает учет проблем ее внедрения, взаимоотношения ее составляющих, обоснование направлений ее практического внедрения, что требует личного участия руководителя предприятия и руководителей структурных подразделений в процессе управления стратегическими изменениями, перераспределения ресурсов с учетом соответствующих критериев оценки работ и развития стимулов и мотивов.

Инновационная активность предприятий сдерживается отсутствием собственных средств, определенными трудностями с материальными ресурсами, недостаточностью государственной поддержки при активном проникновении зарубежных фирм на национальный рынок, что требует от предприятий разработки действенной модели инновационного развития, которая включает ряд этапов с учетом соответствующих критериев эффективности.

Предприятие, как открытая система, представляет собой организованное множество структурных подразделений, которым свойственна относительная целостность и полифункциональность, иерархическая организация, что относится как к

процессу его функционирования, так и инновационного развития. Еще одним методом исследования инновационного развития предприятия является программно-целевой подход, представляющий собой системный выбор целей, которые могут обеспечивать эффективное проведение НИОКР. При этом используются количественные критерии для проведения декомпозиции целей и определения их структуры. Кроме того, необходимым является количественная оценка относительной важности приоритетов целей.

Обеспечение возможности коллективного творческого труда, целенаправленной адресности технических и организационных решений относительно инновационного развития предприятия достигается использованием функционального подхода, положенного в основу функционально-стоимостного анализа. Комплексное использование системного, программно-целевого, функционального методов исследования, а также принципов саморазвития позволяет устанавливать взаимосвязь всех элементов иерархии управления инновационным развитием предприятия.

В условиях конкретной ситуации система управления предприятием может меняться, что предусматривает использование ситуационного подхода, включающего анализ таких составляющих: организационной структуры управления предприятием; методов управления, стиля руководства; стратегии инновационного развития и технологических особенностей производственного процесса; факторов внутренней и внешней среды предприятия. Учет таких составляющих возможен на основе использования инновационного подхода.

Достаточно полный анализ системы управления может быть проведен при условии обеспечения оптимальных условий для принятия управленческих решений в процессе инновационного развития в структурных подразделениях предприятия, принимающих участие в инновационной деятельности. Формирование целей функционирования конкретного структурного подразделения предприятия имеет важное принципиальное значение, так как у предприятия существует множество целей с различным периодом их достижения, а возможности реализации всего их числа ограничено в связи с невозможностью учета всех целей его развития.

Методология стратегического управления позволяет: формулировать цели инновационного развития предприятия; устанавливать последовательность разработки и принятия управленческих решений в виде стратегических прогнозов, планов и программ. Особое значение принадлежит информационному взаимодействию предприятия с внешней средой, которое предполагает сбор, передачу, обработку, сохранение и выдачу оперативной и стратегической информации. информационных каналов, обеспечивающих получение такой информации, которая необходима для принятия обоснованных стратегических решений.

Основные цели стратегии инновационного развития предприятия должны находить свое отражение в комплексной программе его технического развития. Большой удельный вес в общем объеме работ по реализации такой программы занимает комплекс работ и выполнение тематики НДДКР, техническое перевооружение предприятия и его структурных подразделений, которые осуществляют инновационную деятельность. При этом необходимо разрабатывать такую стратегию предприятия, которая обеспечивает поддержку активного творческого процесса по созданию определенного инновационного задела на будущее.

Схема взаимодействия подразделений в процессе разработки и реализации инновационных программ свидетельствует о достаточно широких возможностях ис-

пользования взаимодействия структурных подразделений в процессе инновационной деятельности. При благоприятных изменениях внешней среды предприятие может осуществлять переход к активной творческой инновационной стратегии собственного развития.

Инновационное развитие предприятия осуществляется на основе соответствующей стратегии, основой которой является инновационный потенциал разработанных и освоенных инноваций и факторы внешней среды. Эффективность инновационной стратегии может быть достигнута при выполнении таких требований: способность создавать гибкий процесс принятия стратегических решений и достижений интеграции между всеми структурными подразделениями предприятия, реализующими функции инновационного развития. В процессе осуществления инновационной деятельности возникают определенные противоречия между управлением основной деятельностью предприятия и его научно-технической сферой.

В процессе управления нововведениями важное значение уделяется анализу взаимосвязей элементов инновационного процесса. При этом необходимым является доведение стратегических целей до руководителей всех уровней управления, разработка мотивационного механизма заинтересованности работников предприятия в реализации стратегических целей.

Радикальные инновации могут быть внедрены только на тех предприятиях, которые имеют современную материально-техническую базу проведения НИОКР и высококвалифицированных научно-технических специалистов. Именно удельный вес специалистов, осуществляющих проведение НИОКР, в общей численности персонала предприятия, является показателем степени его инновационного развития. Экономический кризис привел к процессу вымывания интеллекта путем эмиграции отечественных ученых и перехода их в другие отрасли экономики, что отражается на научно-техническом потенциале предприятий. Поэтому важным является оценка научно-технического потенциала в процессе разработки стратегии инновационного развития предприятия, необходимость в новых, более сложных формах организации управления предприятием.

Исследование достоинств и недостатков существующих организационных структур подтвердили целесообразность использования матричных структур. Их достоинством является возможность управления предприятием как единым объектом, в рамках которого сохраняется целевая направленность его структурных подразделений. В качестве одного из эффективных методов формирования организационной структуры управления инновационным развитием предприятия является функционально-стоимостный анализ.

Важное значение имеет количественная оценка влияния инновационной деятельности предприятия на его конечные результаты, которая может быть осуществлена в работе с помощью факторного анализа. Такие модели позволяют каждому конкретному предприятию определять основные направления его инновационной деятельности, которые имеют стратегическую направленность и оказывают влияние на размер прибыли.

С методических позиций определенным интересом представляет установление научно-технического уровня НИОКР. Одновременный учет многих показателей требует различных методических подходов к их оценке, что обуславливает необходимость обоснования критериев оценки, учитывающих достигнутый уровень НИОКР, темпы инновационного развития предприятия и др.

ЛОГІСТИЧНИЙ АУДИТ В СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ ПРОМИСЛОВИМ ПІДПРИЄМСТВОМ

Таньков К.М., Тридід О.М., докт. екон. наук, проф. (м.Харків, Україна)

The questions of bringing in of innovations of logistic procedures to optimization of the control system by activity of industrial enterprise are examined. The basic stages of conducting of the logistic audit directed on support of strategy of making progress development of enterprise in a competition environment are certain. "Logistic audit in the control system by an industrial enterprise".

Більшість аспектів логістики промислового підприємства на даний час вважаються стратегічно значущими. Логістика як великий споживач ресурсів, істотно впливає на його виробничо-економічні показники. За таких умов стає актуальною проблема розробки та впровадження у сферу управління виробничою діяльністю ефективного логістичного аудиту.

Логістичний аудит – це комплексна періодична перевірка середовища логістики, цілей, стратегій та окремих видів логістичної діяльності промислового підприємства [1, 69]. Він здійснюється з метою ортимання надійної та достовірної інформації про його зовнішнє та внутрішнє середовище, в тому числі стан ринків постачання та збуту, конкурентів, логістичні канали, очікуваний споживачами рівень логістичного сервісу і т. ін.

Задача логістичного аудиту полягає у створенні умов для розробки ефективної стратегії виробничо-господарської діяльності промислового підприємства, яка б забезпечила йому отримання довгострокових конкурентних переваг шляхом збору та аналізу існуючих прийомів та показників як власної логістичної діяльності, так і діяльності постачальників, посередників, кінцевих споживачів та конкурентів. В тому числі:

- систематизований огляд поточних логістичних операцій та процедур, витрат, ресурсів, продуктів і т. ін.
- визначення вузьких місць у логістичній системі підприємства та відповідності фактичних результатів її функціонування запланованим заходам, а також визначення шляхів забезпечення ефективності впровадження цих заходів і їх прийнятності для досягнення поставлених цілей.

Логістичний аудит базується як на загальних принципах аудиту так і на своїх специфічних. До загальних відносять принципи, що визначають професійну етику аудитора. Специфічні принципи логістичного аудиту виходять безпосередньо із змісту логістики як самостійного наукового напрямку. Логіст-аналітик повинен мати високі професійні навички і одночасно розумітися у справах суміжних підрозділів підприємства. Як спеціаліст з логістики він, поряд із загальною високою логістичною освітою, має орієнтуватися в поточних справах господарчої діяльності підприємства: розташування складів та організації їх діяльності, знати діючі транспортні тарифи та систему організації транспортних перевезень, дати оцінку в потребі того чи іншого товару (сировини, матеріалів, готової продукції тощо), знати основні підходи до організації виробництва та виконання технологічних операцій. Одночасно з цим він повинен орієнтуватися в питаннях як загального виробничого так і логістичного менеджменту, відслідковувати зв'язки логістики із іншими функціями підприємства.

В основу організації та реалізації логістичного аудиту покладаються підходи

комплексності та узгодженості із маркетинговим аудитом. При логістичному аудиті окремі види робіт досить тісно взаємопов'язані із маркетинговим (насамперед, це дослідження зовнішнього середовища), а в окремих випадках вони можуть бути виконані тільки за умов попереднього проведення маркетингового аудиту. З іншого боку, при виконанні маркетингового аудиту доцільно орієнтуватися на результати логістичного аудиту, що безумовно надає йому більшої вагомості.

До основних видів логістичного аудиту промислового підприємства відносять:

- зовнішній аудит ринку; споживачів; постачальників; конкурентів; каналів розподілу; діяльності підприємств у сфері екології.
- внутрішній аудит виробничих потужностей; фінансово-економічної діяльності; логістичного менеджменту [1,70-74, 2,102-105].

Логістичний аудит складає важливу частину формування логістичної стратегії промислового підприємства, яка враховує всі етапи життєвого циклу виробництва (науково-дослідницьких, проектних, конструкторських та технологічних робіт, організацію виробництва і збуту і т. ін.). За таких умов, при проведенні логістичного аудиту промислового підприємства доцільно орієнтуватися на наступні основні етапи його формування.

1. Етап формування плану досліджень та розробок, прогнозування розвитку техніки, підготовки заявок на освоєння нової продукції, планування розробок.

Забезпечується отримання надійних та достовірних даних про стан національного і міжнародного ринків сировини та матеріалів, тенденціях їх зміни, напрямках науково-технічної діяльності провідних організацій і закордонних фірм в даній галузі, техніко-економічне обґрунтування показників запланованих до закупівлі матеріальних ресурсів.

2. Етап виконання науково-дослідницьких робіт.

Забезпечується обґрунтований вибір стратегічних напрямів створення нової продукції із врахуванням впливу на ці процеси виробництва нових видів сировини та матеріалів (технічний рівень, економічні показники, темпи удосконалення і т. ін.) та формування перспективних вимог до неї, відповідно вимогам провідних споживачів.

3. Етап розробки продукції та технології.

Забезпечується отримання даних, що стосуються:

- створення продукції із техніко-економічними показниками, відповідаючих вимогам конкретних споживачів на конкретних ринках;
- обґрунтування обсягів виробництва продукції із гарантованим продажем;
- аналізу вірогідних якісних змін в товарній масі на перспективу;
- врахування специфічних вимог до продукції з точки зору стандартів і законодавчих регламентів тих країн, до яких передбачається експортувати продукцію.

4. Етап промислового виробництва та реалізації (експлуатації споживачем), а також зняття продукції із виробництва.

Забезпечується отримання даних стосовно:

- ринків, на яких діє підприємство, їх ємність;
- конкурентної спроможності за кожним видом продукції на кожному ринку і в кожному його сегменті;
- вимог, що пред'являються споживачами до продукції;
- відповідності виробничого та збутового потенціалу тенденціям зміни ринку;
- основних споживачів/покупців та конкурентів по кожному виду випускаємої

- продукції/послуг в кожному сегменті ринку;
- відповідності ціни продукції рівню цін конкурентів;
- конкурентоспроможності товару та логістичного сервісу, попиту на них;
- планованих обсягів продажу;
- відповідності рівня сервісу вимогам споживачів в кожному сегменті ринку.

Особлива увага приділяється напрямкам логістичного аудиту, які є характерними тільки для сфери прикладення логістики. Насамперед, це стосується ретельного аналізу постачальників та каналів розподілу.

Таким чином, результати логістичного аудиту служать підставою для офіційної оцінки ефективності логістичної системи підприємства, її відповідності загальній господарській політиці підприємства. За результатами логістичного аудиту та офіційної оцінки вищим керівництвом логістичної діяльності складається програма заходів, спрямованих на її поліпшення, і розробляється система коригувальних і попереджувальних дій.

Література: 1. Тридід О.М., Таньков К.М. Логістичний менеджмент: Навчальний посібник. – Х.: ВД “ІНЖЕК”, 2005. – 224 с. Укр. Мова. 2. Таньков К.М., Тридід О.М., Колодизева Т.О. Виробнича логістика: Навчальний посібник. – Х.: Видавничий Дім “ІНЖЕК”, 2004. – 352 с. Укр. Мова.

УДК 330.322.3

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛЬНЫХ ИНВЕСТИЦИЙ

Орлов П.А., докт. экон. наук, проф. (г. Харьков, Украина)

Theoretical generalization of domestic and foreign methodical approaches to the evaluation of effect and efficiency of real investments was executed. The necessity of general and comparative efficiency distinguishing and effect and efficiency of investment project distinguishing were grounded. Recommendations concerning the necessity to take into account accompanying social, economic and ecological consequences an innovations were given. Recommendations on the evaluation of comparative efficiency of investments were given.

Под реальными инвестициями (капитальными вложениями) понимают вложение средств в создание, приобретение или улучшение основных фондов, проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, подготовку персонала, увеличение оборотных фондов, природоохранные мероприятия, приобретение или создание нематериальных активов, проведение маркетинговых операций.

В отечественной теории и практике до 1991 г. различали расчеты сравнительной и общей эффективности капитальных вложений. В зарубежной же литературе не выделяют понятия “эффект” и “эффективность”, “общая” и “сравнительная эффективность” инвестиций, что является упущением. В нашей стране, к сожалению, до настоящего времени преобладает чрезмерное преклонение перед зарубежными методами экономической оценки инвестиций.

В отечественной литературе, изданной до 1991 г. при экономической оценке капитальных инвестиций использовали следующие трактовки понятий “эффект” и “эффективность”. *Эффект* - это полезный результат, обеспечиваемый в результате реализации инвестиционного проекта, который может быть экономическим, социальным, экологическим, научно-техническим, ресурсным.

Для повышения обоснованности оценки капитальных вложений необходимо

как можно полнее представить не только экономический эффект, но и сопутствующие социальные и экологические результаты. Вопросы стоимостной оценки сопутствующих полезных результатов были достаточно хорошо разработаны в бывшем СССР [1].

Эффективность предполагает сопоставление эффекта с затратами или ресурсами его обеспечившими. С этой точки зрения показатель чистого текущего дохода (финансового результата, стоимости) (NPV), широко используемый за рубежом и в странах СНГ является показателем эффекта, а коэффициент внутренней рентабельности проекта (IRR), модифицированный коэффициент внутренней рентабельности проекта ($MIRR$), дисконтированный срок окупаемости инвестиций, коэффициент рентабельности проекта следует отнести к показателям эффективности. В этой связи нельзя согласиться с Четыркиным Е.М., который показатель NPV считает измерителем эффективности инвестиций [2].

В зарубежной литературе чаще всего приводится следующая формула NPV проекта реальных инвестиций [4, с. 94]:

$$NPV = \sum_{t=0}^n Ct(1+i)^{-t}, \quad (1)$$

где Ct – денежный поток в конце периода t ; i – стоимость денег во времени для данной фирмы (норма дисконтирования); n – жизненный цикл инвестиционного проекта.

Более удобной и понятной представляется следующая формула этого показателя, но уже с учетом стоимостной оценки сопутствующих социальных, экономических и экологических полезных результатов:

$$NPV = \sum_{t=0}^T (\dot{I}_t + A_t + \dot{Y}_t - H_t + \ddot{E}t) \cdot (1+i)^{-t} - K_{\Sigma}, \quad (2)$$

где T – продолжительность жизненного цикла инвестиционного проекта, лет; Π_t – явная прибыль от реализации проекта в году t ; A_t – амортизация на реновацию в году t ; \dot{Y}_t – стоимостная оценка сопутствующих социальных, экологических и экономических полезных результатов, полученных в году t ; H_t – налог на прибыль в году t ; t – год, результаты и затраты которого приводятся к расчетному; Lt – ликвидационное сальдо или выручка от реализации имущества, выбывающего в году t , за вычетом связанных с этим расходов; K_{Σ} – суммарные капитальные вложения на реализацию проекта, приведенные к начальному моменту времени; i – норма дисконта в долях единицы.

При этом искусственно вводить нулевой расчетный год для учета фактора времени представляется целесообразным, только в тех случаях, если начало реализации проекта планируется в первой половине года. Если же начать реализацию проекта предполагается во второй половине года, то в качестве расчетного следует принимать первый год, а не нулевой, как в формуле (2).

Отсутствует единая трактовка экономической сущности показателя NPV . Так, Д. Норткотт пишет: “Чистая текущая стоимость проекта - это разница между текущей стоимостью прибыли и затратами на инвестиции”. [5, с. 43]. Здесь не уточняется какая прибыль имеется в виду экономическая или бухгалтерская (явная). Кроме того, существует несколько различных показателей прибыли.

Можно дать следующую экономическую интерпретацию NPV – это текущая

чистая экономическая прибыль (убыток) от реализации инвестиционного проекта. Инвестиционный проект может быть внедрен, если NPV больше или равен нулю. Равенство NPV нулю означает, что проект обеспечит получение только чистой нормальной прибыли, которую инвестор мог бы получить и при использовании инвестиционных ресурсов для других целей.

Некоторые недостатки, присущие коэффициенту внутренней рентабельности проекта (IRR) в тех случаях, когда денежные потоки два и более раз меняют знак с минуса на плюс, приводят к тому, что многие авторы завышают значимость показателя NPV [6, с. 80].

Напомним, что при определении общей эффективности рассчитывают результат и результативность уже осуществленных или запланированных капитальных инвестиций и при этом нет необходимости делать выбор лучшего варианта из ряда альтернативных.

Но на этапе же планирования инвестиций и инноваций необходим отбор лучших вариантов, так как чаще всего существует много альтернативных вариантов решения любой производственной задачи. Здесь необходимы расчеты сравнительной эффективности. Широкое распространение получило заблуждение, что сравнительная эффективность капитальных вложений может быть определена на основе только среднегодовых показателей. На самом деле сравнительную эффективность можно определять и на основе показателей, рассчитанных с использованием дисконтирования за несколько лет. Доказательства этому можно найти и в зарубежной литературе. Так, в книге Р. Холта приведен расчет показателя NPV для проекта замены старого завода новым [3, с. 73-76], хотя нет даже упоминания о расчетах сравнительной эффективности инвестиций и о принципах, на которых они должны основываться. Нет этого и в работах других авторов из промышленно развитых стран.

Другим важным моментом является правильный учет амортизационных отчислений как при определении сравнительной так и абсолютной эффективности инвестиций. Нет даже единства по вопросу относить амортизацию к издержкам производства или к доходу. Так, Пересада А. пишет: “В зарубежной практике в чистую прибыль включаются амортизационные отчисления на реновацию, как собственность инвестора. В нашей практике это издержки производства (себестоимость)” [6, с. 189]. На самом деле и у нас и у них амортизационные отчисления относят к издержкам производства. Дело в том, что амортизационные отчисления прибавляются к прибыли Π_t только для того чтобы не допустить двойного счета этих затрат.

Суммарные амортизационные отчисления за жизненный цикл инвестиционного проекта определяются суммарными инвестициями в проект, а годовые суммы амортизационных отчислений, учитываемые со знаком минус при расчете ежегодной прибыли и затем прибавляемые к этой прибыли взаимно уничтожаются и дают нулевые результаты в каждом году.

При расчете сравнительной эффективности инноваций всех видов необходимо соблюдать следующие основополагающие принципы:

- 1) правильный выбор базы сравнения;
- 2) комплексная оценка вариантов не только по экономическим, но и по социальным и экологическим последствиям;
- 3) предварительное приведение сравниваемых вариантов к сопоставимому виду по объему производимой продукции, ее качеству, ценам, социальным и экологическим результатам, фактору времени;
- 4) определение влияния нововведений на конечные

результаты производства, а не на промежуточные; 5) учет фактора неопределенности (риска); 6) рассмотрение максимально возможного числа альтернативных вариантов.

Первые четыре принципа широко освещены в отечественной литературе.

Нарушение этих принципов приводит к принятию ошибочных инвестиционных решений, к разработке и освоению производства неконкурентоспособной продукции.

Требование комплексной оценки вариантов инноваций с точки зрения не только экономических, но социальных и экологических результатов особенно актуально в настоящее время в связи с острой необходимостью улучшения экологической обстановки в стране и в мире. Техника, обеспечивающая сокращение тяжелого физического труда во вредных условиях (высокая загазованность, запыленность, температура, шум и т.д.), может внедряться независимо от экономического результата ее использования. С другой стороны, варианты, не отвечающие требованиям действующих правил техники безопасности, социальных и экологических стандартов, не должны рассматриваться и внедряться.

На выбор значения нормы дисконтирования влияют: величина годового реального банковского процента; годовой темп инфляции; уровень риска (если принимается такой метод его учета).

При этом, если величины ежегодных затрат и результатов исчислены в реальных ценах (денежных единицах), то за основу нормативного коэффициента часто необходимо принять величину реального годового банковского процента. В случае, когда величины ежегодных затрат и результатов выражены в номинальных ценах, за основу нормативного коэффициента следует принять значение номинального годового банковского процента. Приведение разновременных затрат и результатов можно осуществлять не только в годовом, но и в помесечном разрезе.

Эффективность инноваций, связанных с совершенствованием техники и технологии производства, рассчитываемая как на основе среднегодовых показателей, так и показателей, NPV, IRR, MIRR, DPP за жизненный цикл проекта, должны определяться только на основе принципов расчета сравнительной эффективности.

Так, интегральный экономический эффект технологических инноваций \mathcal{E} , характеризующихся неравномерностью получения полезных результатов и продолжительным периодом инвестирования (реконструкция цеха, внедрение промышленных манипуляторов, энергосберегающих технологий) рассчитывают с использованием формулы NPV и на основе принципов определения сравнительной эффективности инвестиций

$$\mathcal{E} = \sum_0^T (\Delta C_t + A_t - K_t - H_t + \ddot{E}_t + \dot{Y}_t) \alpha, \quad (3)$$

где ΔC_t – экономия текущих затрат в году t , обеспечиваемая в результате внедрения инноваций, рассчитанная с учетом амортизации на реновацию; A_t – амортизация на реновацию в году t , обусловленная инвестициями; K_t – капитальные затраты в году t ; H_t – налог на прибыль в году t с суммы экономии текущих затрат; T – жизненный цикл инновации, год.

Эффективность рассматриваемых инноваций характеризуется коэффициентом внутренней рентабельности (IRR), модифицированным коэффициентом внутренней рентабельности (MIRR) и дисконтированным сроком окупаемости капитальных вложений.

Литература: 1. “Методические рекомендации по комплексной оценке эффективности мероприятий, направленных на ускорение НТП”, М. 1998. 2. Четыркин Е.М. Финансовый анализ инвестиционных проектов. - М: Дело, 2001. с.115.256 с. 3. Холт Роберт Н. Основы финансового менеджмента. - Пер. с англ.- М.: “Дело Лтд”, 1995. - 128 с. 4. Бирман Г., Шмидт С. Экономический анализ инвестиционных проектов / Пер. с англ. под ред. Л.П. Белых. - М: Банки и биржи. ЮНИТИ, 1997, с. 94-95. 5. Норткотт Д. Принятие инвестиционных решений: Пер. с англ. Под ред. А.Н. Шохина- М.: Банки и биржи, ЮНИТИ, 1997. - 247 с. 6. Пересада А.А. Основы инвестиционной деятельности. К.: Издательство Либра ООО, 1996. - 344с.

УДК 338.45

ІННОВАЦІЙНА МОДЕЛЬ РОЗВИТКУ ДЕРЖАВИ

Мартиненко В. Я., докт. техн. наук, проф., **Федишин Б. П.**, канд. екон. наук
(м. Тернополь, 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 науководослідних 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 право-

вим 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 підприємство.

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 народногосподарському 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 розвитку. На нашу думку – це основні послідовні етапи, які можуть здійснюватися, уточнюватися, але їх обійти неможливо.

Державна інноваційна політика може формуватися на основі розглянутих трьох моделей стратегій розвитку, запропонованих російськими вченими В.Фрідляновим, Р.Некрасовим, С.Остапюком: “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-повірених 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 доквілля.

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 (ІРК) застосовують інвестиційні податкові кредити. В США до 1986 року їх використали більше половини фірм, крім цього підприємства 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 РСПП. – 1998. – ст.8. 2. Фридлянов В., Некрасов Р., Остапюк С. Инновации как фактор экономического роста // Общество и экономика. – 1999.- №7-8- ст.115-116.

УДК 658.7

МОДЕЛЮВАННЯ ЛОГІСТИЧНИХ ВИТРАТ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

Колодізева Т.О., канд. екон. наук, **Руденко Г.Р.** (м. Харків, Україна)

The value of logistics costs in that part of their part which one is connected to maintenance of operational reliability of a logistics system of enterprise, has probabilistic nature. For forecasting of a level of logistics costs it is offered to use econometric model where by the accounting for factor the reliability level of a logistics system will act.

Основний принцип концепції логістики – принцип системного підходу дає наукове обґрунтування для розгляду логістичної системи промислового підприємства як складної динамічної системи, що складається з окремих, але нерозривно пов'язаних підсистем, які за характером виконання функцій та їх ролі у забезпеченні оптимального просування інтегрованого матеріального потоку досить різні у плані впливу на економічні параметри логістичної діяльності підприємства. В цьому контексті актуальним є дослідження логістичного процесу з позиції постійного пошуку компромісів між шансами в сфері логістики щодо підвищення ефективності функціонування підприємства та обмеженнями, які мають, як правило, економічний характер.

Логістична система підприємства має, як відомо, подвійне завдання – мінімізація логістичних витрат при оптимальному рівні обслуговування споживачів. Оптимальний сервіс передбачає, передусім, мінімізацію логістичних ризиків, тобто підвищення надійності функціонування логістичної системи. Отже, зниження логістичних витрат є можливим лише в умовах надійного функціонування всіх підсистем логістичної системи. Підвищення надійності функціонування логістичних підсистем з іншого боку,

призводить до додаткових логістичних витрат.

Моделювання логістичних витрат промислового підприємства передбачає вибір критерію оптимальності; розробку функції “витрати-надійність” для всіх логістичних підсистем підприємства; побудову економіко-математичної моделі логістичних витрат підприємства.

З точки зору зв'язку логістичних витрат з рівнем надійності функціонування логістичної системи, пропонується доповнити існуючу класифікацію логістичних витрат, а саме, додатково поділяти їх на умовно-змінні, які не пов'язані з рівнем надійності логістичної підсистеми та ті, що пов'язані. Умовно-постійні витрати також пропонується доповнити розподілом на ті, що пов'язані з рівнем надійності функціонування логістичної підсистеми та на ті, що не пов'язані. Отже, загальні логістичні витрати будуть складатись з витрат, пов'язаних з рівнем надійності функціонування логістичної системи підприємства та витрат, які з фактором надійності не пов'язані.

Виходячи з вищесказаного, величину сукупних річних логістичних витрат по інтегрованій логістичній системі підприємства можна подати у наступному вигляді:

$$LB = \sum_{i=1}^n [ZVi + ZV(P)i + PVi + PV(P)i], \quad (1)$$

де LB – сукупні логістичні витрати по логістичній системі підприємства; ZVi – умовно-змінні витрати i -ої логістичної підсистеми, що не залежать від рівня надійності; $ZV(P)i$ – умовно-змінні витрати i -ої логістичної підсистеми, що залежать від рівня надійності; PVi – умовно-постійні витрати i -ої логістичної підсистеми, що не залежать від рівня надійності; $PV(P)i$ – умовно-постійні витрати i -ої логістичної підсистеми, що залежать від рівня надійності; P – рівень надійності функціонування логістичної підсистеми. В загальному вигляді логістичні витрати промислового підприємства є функцією від одиниць матеріального потоку та від рівня надійності; n – кількість логістичних підсистем підприємства:

$$LB = \phi(Q, P), \quad (2)$$

де Q – кількість одиниць матеріального потоку.

Економетрична модель логістичних витрат у структурній формі, яка дає можливість описувати одно- та багатосторонні стохастичні причинні співвідношення між економічними величинами в їх безпосередньому вигляді пропонується відобразити наступним чином:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Умовно-змінні витрати логістичної підсистеми} \\ \text{Умовно-постійні витрати логістичної підсистеми} \\ \text{Загальні витрати логістичної підсистеми} \end{array} \right\} \begin{cases} Ct = (c_t + \alpha_1 p_t) \times q_t + \alpha_0, \\ Tt = \bar{T}_t + \beta_1 p_t + \beta_0, \\ Yt = Ct + Tt \end{cases} \quad (3)$$

де $Ct, c_t, q_t, Tt, \bar{T}_t, p_t, Yt$ – відповідно за термін часу t умовно-змінні витрати логістичної підсистеми; змінні витрати на одиницю матеріального потоку, що не залежать від рівня надійності; кількість одиниць матеріального потоку, що оброблює дана логістична система; умовно-постійні витрати даної логістичної підсистеми; середні умовно-постійні витрати в тій їх частині, що не залежить від фактору надійності функціонування логістичної системи; надійність функціонування даної логістичної підсистеми; загальні витрати логістичної підсистеми; $\alpha_1, \beta_1, \alpha_0, \beta_0$ – коефіцієнти регресії та вільні члени рівнянь регресії відповідно.

Таким чином, можна визначити зв'язок обох критеріїв функціонування логістичної системи – логістичних витрат та рівня надійності функціонування логістичних підсистем. Особливістю використання критерію надійності інтегрованої логістичної системи в порівнянні з критерієм оптимізації логістичних витрат є відсутність компромісів щодо прийняття рішень про рівень надійності. Якщо при визначенні рівня логістичних витрат доводиться йти на економічні компроміси, а саме поступатися зниженням витрат окремих підсистем заради досягнення мінімальних витрат в цілому по інтегрованій логістичній системі, то, щодо рівня надійності окремих логістичних підсистем такі компроміси приймати не потрібно. Навпаки, рівень надійності інтегрованої логістичної системи тим вище, чим вище рівень надійності всіх логістичних підсистем. Пропонується ввести поняття критичного рівня надійності – мінімального з рівнів надійності логістичних підсистем. Мінімальний рівень надійності однієї з логістичних підсистем буде визначати рівень надійності усієї логістичної системи.

Поняття надійності є оберненою величиною поняттю ризику, основними факторами якого є частота та розмір ризику. Отже вимірювання надійності можна здійснювати через збитки (згідно існуючої класифікації) [1]:

перший клас – прямі збитки, пов'язані з обладнанням та майном;

другий клас – непрямі збитки, що виражені у втраті доходу;

збитки, пов'язані з відповідальністю;

збитки, пов'язані з ключовими фахівцями.

Програма забезпечення надійності (1) повинна містити наступні етапи: аналіз ризиків; виявлення критичних точок контролю; встановлення критичних параметрів; встановлення процедур моніторингу та діагностики; розробку корегуючих дій; створення документації; оцінка виробітку та ефективності.

Як відомо, метою логістичного аналізу, як і будь-якого аналізу, є виявлення резервів підвищення ефективності функціонування. Використання критерію надійності функціонування логістичної системи дозволить виявити “вузькі” місця, тобто логістичні системи з мінімальним рівнем надійності та розробити відповідні заходи щодо підвищення надійності саме цих систем, що дозволить підвищити логістичні результати: якість, виробіток, безпеку.

Література: 1. Миротин Л.Б., Некрасов А.Г. Логистика интегрированных цепочек поставок: Учебник / Л.Б. Миротин, А.Г. Некрасов. – М.: Издательство «Экзамен», 2003. – 256 с.

УДК 330.314.1

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ОСВОЄННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ІННОВАЦІЙ

Лукашев С.В., канд. екон. наук, **Мельникова К.В.**, канд. екон. наук
(м. Харків, Україна)

Modern features of introduction of technological innovations at the enterprises and factors which define purchase of foreign technologies and problems of their adaptation in Ukraine are considered. Modern problems of introduction of technological innovations.

Україна має значний науковий і технологічний потенціал, але взаємозв'язок винаходів з виробничою діяльністю здійснюється складніше, ніж у промислово розвинених країнах. Глибока системна криза, нестабільність управлінських структур, часта зміна кадрів, недостатнє фінансування передбачених законодавством заходів негативно позначилися на змісті, послідовності та результативності реалізації захо-

дів інноваційної політики в нашій країні.

Досвід розвинених країн свідчить про те, що вирішальне значення має ефективність використання наукових та технічних досягнень, завдяки яким зростає конкурентоспроможність товарів та послуг на всіх ринках. Так, об'єднання елементів ринкової економіки з елементами державного регулювання є шляхом до економічного успіху. За оцінками експертів, ринковий розподільчий та адаптаційний механізм не завжди достатньо ефективний для того, щоб ініціювати структурні та технологічні зміни у виробництві, які бажані з точки зору довгоочікуваних економічних, соціальних та політичних інтересів [1, 2]. Тому високорозвинені країни активно формують мислення господарюючих суб'єктів на співпрацю з інноваціями, створюючи певні сприятливі умови.

Відсутність ефективної державної інноваційної політики, спрямованої на створення реальних заходів для переходу національної економіки на інноваційну модель розвитку, спричинить подалі відставання України від розвинених країн світу в напрямку формування постіндустріального суспільства на базі прогресивних технологічних укладів, виробництва нових видів конкурентоспроможної високотехнологічної продукції. Наслідком такого відставання стане звуження внутрішнього і зовнішнього ринків для вітчизняної продукції й у цілому призведе до зниження конкурентоспроможності національної економіки й стагнації науково-технічного та виробничого потенціалу.

Основним завданням Державної інноваційної політики України є інтенсифікація впровадження інновацій та організаційних рішень у сфері матеріального виробництва, експлуатації, послуг. Ця задача повинна бути досягнута шляхом стимулювання та просування інноваційних тенденцій у суспільстві та серед господарюючих суб'єктів, а також шляхом підтримки розвитку інноваційних організацій.

Домінуючим фактором прогресу в Україні на майбутні роки мають стати інтелектуальні цінності, що втілені в нових ідеях, науково-технічних розробках, інформаційних та інших високих технологіях. Комерціалізація результатів інтелектуальної діяльності є найбільш потужним фактором соціально-економічного прогресу.

За період з 1999 р. до 2004 р. [3] позитивним є збільшення числа інновацій у формі продукту і впровадження нових прогресивних технологій.

Перевага продуктових інновацій перед базисними - інноваціями відповідає специфіці економіки перехідного періоду. А саме під впливом ринкового попиту прив до нової технологічної моделі розвитку починається з базисних продуктових інновацій, що згодом сприяють перебудові всієї технологічної основи виробництва.

Поряд з тенденцією збільшення кількості інновацій у формі продукту, простежується тенденція зменшення кількості технологічних інновацій. Збільшення нововведень, орієнтованих на впровадження нової продукції, виражає пріоритетний напрямок інноваційної діяльності промислових підприємств, обумовлений змінами в українській економіці.

На інноваційну діяльність активно впливає найважливіший фактор ринкової економіки – конкуренція, а саме, між вітчизняними і закордонними товаровиробниками, що змушує підприємства активно вишукувати ринкові сегменти з погано задоволеним і незадоволеним попитом, переорієнтовувати випуск продукції відповідно до змін і вимог споживачів, що в остаточному підсумку приводить до збільшення продуктових інновацій. Так само в умовах обмежених фінансових ресурсів перевага віддається менш витратним продуктовим інноваціям.

Частка продуктових інновацій набагато вище, ніж технологічних, і може бути, що в числі нових продуктів виявиться нова для даного підприємства, але технічно не більш удосконалена продукція.

Аналіз мотивацій і цілей відновлення технологічної бази виробництва показав, що ринкові фактори також впливають на прийняття рішень про освоєння процесів-інновацій.

Забезпечення більшої гнучкості виробництва стало головним фактором, що стимулює технологічні зміни. Це прямо пов'язано з загальною невизначеністю трансформаційних процесів, необхідністю швидкого пристосування до мінливого попиту на товарних ринках.

Наступними за значимістю факторами, що стимулюють впровадження технологічних інновацій, є економія енергоресурсів і зниження матеріальних витрат.

Серед факторів, що стримують освоєння технологічних і продуктових інновацій, можна виділити: нестача власних фінансових ресурсів, низький інноваційний потенціал підприємства, неплатоспроможність замовника, незадовільні умови інвестування і кредитування, зниження попиту, економічний ризик освоєння нової продукції, висока вартість нововведень відсутність кваліфікованих кадрів, необхідної інформації про вітчизняні й іноземні технології.

У табл. 1 наведені фактори, що визначають закупівлю технологій за рубежом і проблеми адаптації іноземних технологій і ліцензій до умов експлуатації в Україні.

Таблиця 1

Фактори, що визначають закупівлю іноземних технологій і проблеми їх адаптації в Україні

Фактори, що визначають закупівлю іноземних технологій	Проблеми адаптації іноземних технологій в Україні
<ol style="list-style-type: none"> 1. У країні відсутні аналоги закуповуваного технологічного устаткування. 2. У країні не виробляються необхідні науково-дослідно та дослідно-конструкторські роботи. 3. Технологія дозволяє вийти на зовнішній ринок. 4. Технологія дозволяє вийти на західні технологічні й екологічні стандарти. 5. Технологія забезпечує значну економію енергії і матеріалів. 6. Західне устаткування більш дешево. 7. Більш вигідні умови постачання. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Відсутність кадрів необхідної кваліфікації. 2. Відсутність матеріалів і комплектуючих виробів необхідної якості. 3. Необхідне проведення значного обсягу науково-дослідних робіт для адаптації західних технологій. 4. Західні технології несумісні з діючими на підприємстві технологіями. 5. Труднощі в пошуку наукової організації, яка б проводила роботи з адаптації західних технологій і ліцензій.

Найбільш важливим стимулом до придбання іноземних технологій і ліцензій є те, що завдяки їм можна вийти на світовий технологічний ринок, перейти до світових технологічних й екологічних стандартів.

Одним з найважливіших завдань є економічно доцільне заміщення продукції, що ввозиться та користується попитом на внутрішньому ринку, організація її вироб-

ництва на території України.

Література: 1. Крейчман Ф.С. Эффективная организация управления акционерным обществом в условиях рынка. М., 2000. - 316 с. 2. Лапко О.О. Інноваційна діяльність як фактор підвищення ефективності вітчизняної економіки // Фінанси України. - 1998. - №6. - С. 31-37. 3. Наукова та інноваційна діяльність в Україні. Статистичний збірник. Київ, 2002. - 154 с.

УДК 621.9.011

НАУКОВА ШКОЛА – ЛАНКА ДЛЯ АКТИВІЗАЦІЇ ІННОВАЦІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ В УКРАЇНІ

Ларшин В.П., док. техн. наук, **Бажанов А.І., Міщенко О.М., Ларшина А.В.**
(м. Одеса, Україна)

Scientifical research forms and methods as well as scientifical school role in the innovation work in Ukraine are given.

Інновації є результатом тривалих наукових пошуків та досліджень, які виконуються багатьма людьми. Тенденція колективності в науці ще за радянських часів здобула собі повне право на існування. Аналогічна тенденція має місце у західних країнах, де часто створюються тимчасові міжнародні колективи для вирішення тієї чи іншої проблеми сучасного природознавства. Аналіз показує, що питома вага винаходів, що мають одного автора щороку зменшується, трьох і більше авторів – збільшується. Пошук можливостей розширення зони інформованості приводить до встановлення контактів між вченими, які працюють як в одному науково-інноваційному напрямі, так і в інших галузях науки, як між членами одного організаційно оформленого колективу, так і між представниками різних, часом віддалених один від одного на сотні і тисячі кілометрів колективів. Таким чином створюються своєрідні “віртуальні” колективи вчених. подібно тому, як в сучасній промисловості створюються так звані віртуальні заводи, які функціонують як єдиний механізм не зважаючи на територіальну розрізненість. Позитивний вплив на інформаційну продуктивність вченого мають контакти як із співробітниками свого колективу, так і з колегами з інших колективів. Розширення загальної зони інформованості вчених за рахунок інформаційних технологій електронного зв’язку приводить до появленню додаткових вимог що до якості і рівня проведених наукових досліджень. Багаторічний досвід організації наукових досліджень показує, що найбільш важливі для народного господарства результати були отримані науковими школами, керованими відомими вченими-основоположниками тих чи інших наукових напрямків.

Аналіз фактичних матеріалів, теорій і гіпотез сучасного природознавства, а також чисельних філософських публікацій по методологічним проблемам цих наук, дозволяють затверджувати, що філософія і методологія інноваційної діяльності в сучасному світі цілком має самозатверджуюче право як нового, необхідного філософського напрямку, що перетворюється в один із найзначніших принципів розвитку науки.

Реалізація наукових ідей в інноваційної діяльності людства спонукає до удосконалення форм і методів співробітництва, стиля і прийомів наукової критики, змісту і організації наукових дискусій, утворенню умов для вільного обміну думками і сподіваннями в науковій пресі, а також засобах електронної інформації.

На рівні наукової методологічної форми взаємозв’язку філософії і природознавства виникає їх справжня єдність, складається відповідність форми і змісту.

Філософський аспект досліджень в інноваційній діяльності людини виступає не тільки в якості світового бачення і загальної методології, але і як сукупність визначних критеріїв, які використовуються для створення концепції окремих конкретних патентнознавських складних наукоємних рішень. Поняття і образи сучасної інноваційної діяльності стали настільки абстрактними і складними, а експерименти – дорогими і важкими для виконання, що вирішити, яка із багатьох альтернативних теорій є більш переважною, часто стає можливим тільки, якщо на певному етапі досліджень в якості інноваційних критеріїв використовувались загально філософські положення. Це впливає з ієрархічного принципу побудови науки, у відповідності з яким філософія і методологія займають більш високий рівень ієрархії у порівнянні з прикладними науками. Принцип ієрархії проявляється також і в прикладних, наприклад у тому, що наукові критерії займають більш високий рівень ієрархії у порівнянні з способами та алгоритмами забезпечення цих критеріїв. Критерії виступають в якості вимог (завдань), які необхідно забезпечити. Наприклад, критерії безопікового шліфування є зрозумілим і прозорим. В той час, як алгоритми його забезпечення, які включають багаточисельні вимірювання та ітераційні обчислювальні процедури, відносяться до категорії know-how (“ноу хау”).

За допомогою філософсько-методологічного підходу в різноманітних галузях народного господарства України з’являється можливість інтегрування та синтезування окремих наукоємних проблем. Для цього, наприклад, може бути проведена оптимізація взаємодії створюваних технічних систем з біосферою, яка у принципі, має привести до повної гармонізації технічної діяльності з порядком, що панує у природі. Порядок у природі забезпечується її ієрархічною багаторівневою структурою, що є результатом довготривалої еволюції. Діяльність у природному середовищі потребує адаптації до цих умов. Існуюча структура біосфери має накладати обмеження на ступінь свободи штучних систем, роблячи їх функціонування таким, що не суперечить тому порядку, який існує в біосфері. При системному підході до даної проблеми технічні системи мають бути представлені не як конфронтуючі з біосферою автономні системи, а як інтегровані підсистеми біосфери на основі використання наукової методології, аналізу та синтезу. В такому разі вже під час патентування концепції майбутньої ідеї та проектування і розробки промислових зразків технічних систем, доводиться враховувати ті обмеження на ступінь їх свободи, які мають виконуватися, щоб не порушилися умови системної біосфери. Для цього, мабуть, варто змінити вихідний принцип проектування технічних систем – екологічні вимоги треба закладати в програми створення природоперетворюючих систем. Наприклад, при розробці твердих технологічних мастил для шліфування важкооброблюваних матеріалів необхідно забезпечити екологічні вимоги щодо безпеки роботи з цими мастилами. При розробці мобільних машин традиційне паливо заміняють на бінарне та паливні елементи, які є екологічно чистішими у порівнянні із традиційним паливом.

Відмітною рисою сучасного наукового колективу є розвинута внутрішня структура, яка характеризується наявністю кількох різних за можливостями інформаційних технологій, а також збільшення загальної кількості учасників наукового пошуку, що виконують різні проміжні операції в цьому процесі, який побудований на основі принципу ієрархії.

В сучасному, під час дуже малому науковому колективі є розвинута внутрішня структура, яка характеризується наявністю кількох різних за інформаційними мож-

ливостями вчених, багаторазовим перекриттям сфер інформаційних можливостей, участю в науковому процесі вченого, пропозиції якого істотно відрізняються від застарілих підходів до розв'язання спільної проблеми, появою наукових співробітників, які за своїми інформаційними можливостями не є провідними, але роблять у загальну справу свій специфічний вклад. Ця нова структура наукового колективу сформулювалося під впливом цілої низки об'єктивних чинників, серед яких головне місце належить зростаючим вимогам до ефективності наукового процесу, посилення його складності і значного ускладнення інформаційного стану в науці.

Багатогалузєва інформація спряжена з витратами великих зусиль на впровадження здобутих результатів досліджень в народне господарство України. Така багатопланова і специфічно складна робота під силу тільки згуртованим колективам, які раціонально укомплектовані добре підготовленими спеціалістами різних категорій і організовані відповідно до вимог науки про управління, озброєні найсучаснішим науковим інструментарієм і здійснюють цілеспрямований, енергійний науковий пошук. Важливе місце в цій роботі відводиться малим науковим колективам відомим як наукові школи. В якості прикладу розглянемо наукову школу професора О.В. Якімова.

Професор Олександр Васильович Якимов – видатний вчений-технолог, 80-річчю з дня народження якого присвячується 11-а Міжнародна науково-технічна конференція “Фізичні та комп'ютерні технології”. Знаходившись у витоків створених ним наукових напрямків, професор О.В. Якимов є основоположником вчення про якість поверхневого шару деталей машин при їх фінішній обробці. Він створив і є керівником відомої наукової школи, яка працює в цьому напрямку. Творча робота в науковій школі професора О.В. Якімова заснована на спадковості рішень, що приймаються. Ця спадковість заключається у тому, що в нових рішеннях використані попередні розробки, які перевірені лабораторною та виробничою практикою. Характерними рисами наукової школи професора О.В. Якімова являються доброзичливий стан у творчому колективі та нерозривний зв'язок наукових досліджень з промисловістю та навчальним процесом у вузі. Це дозволяє суттєво поліпшити якість підготовки спеціалістів, усунути відоме протиріччя між розробкою нових прогресивних технологій та виробництвом у яке ці технології впроваджуються. Варто відмітити, що вузівська кафедра – це не лабораторія науково-дослідного інституту. Її головна турбота – навчання студентів та підготовка інженерних кадрів для машинобудівних підприємств України. На цю сторону справи у Олександра Васильовича Якімова є своя точка зору, яка формувалась роками. Він вважає, що науково-технічний прогрес та виховання інженера невід'ємні одне від одного. У період ринкових відносин студентів варто прилучати до нового, вчити мислити, прививати їм навички дослідника. А для цього потрібно кожного студента з першого дня його перебування у вузі занурити у атмосферу творчості, безперервного наукового пошуку. Важливість студентської наукової роботи важко переоцінити. Адже це аксіома: чим більше людина захоплена своєю справою, тим більше віддачі можливо очікувати від неї, тим яскравішим є її приклад. Доказів довго шукати не треба. Творчий шлях кожного з учнів професора О.В. Якімова починався з занять у наукових гуртках вузів. Причому всі вони не тільки успішно засвоювали програму навчання, але і створювали суттєве підґрунтя для свої майбутніх наукових робіт.

4. ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ МАШИН, ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИКИ, МЕХАНИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

УДК 519.88

РАЗРАБОТКА САПР ДИНАМИКИ МАШИН НА ОСНОВЕ СПЕЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ АЛГЕБРЫ

Андреев Ю.М., канд. техн. наук, **Морачковский О.К.**, докт. техн. наук, проф.
(г. Харьков, Украина)

The frame and organization of a system of computer algebra, as cores of a CAD for researches in mechanics of machines is esteemed. The structure of the source language for the description of models and problems, the algorithms of analytical and numerical calculus, estimations of their efficiency, and examples of the solution of classic and applied problems of mechanics are adduced.

Введение. В программных средствах современных САПР получают распространение объектно-ориентированные подходы и системы компьютерной алгебры (СКА), что способствует повышению интеллектуальных способностей разработок и позволяет аналитически реализовать описание и вычисления в сложных предметных областях. Известный опыт использования в САПР стандартных СКА, таких как MATHCAD, MATLAB и других, свидетельствует о неэффективности такого пути, из-за необходимости в разъединении этапов формирования исходных данных для описания предметной области и математических моделей, искусственного формирования аналитических выражений и преимущественного сведения к численной реализации алгоритмов решения задач. Появление САПР, основанных на специальных СКА, показывает, что на этом пути еще на этапе формирования исходных данных можно на аналитическом уровне эффективно автоматизировать описание и решение проблем широкой предметной области. Специальная организация исходных данных в формульно-аналитическом виде допускает задание лишь информации, необходимой для решения проблемы, сократить путь от формулировки задач до получения результатов, а, следовательно, способствует повышению эффективности синтаксической и семантической диагностики данных и позволяет решать задачи предметной области аналитическими или численно-аналитическими методами, снизив вероятность вычислительных ошибок. На технологию программных разработок САПР, основанных на специальных СКА, существенно повлияло появление современных языков и сред для программирования, например, АЛГОЛ-68 и Borland Builder C++. В последней четверти XX века такие САПР начали интенсивно разрабатываться в динамике машин [8]. Указанным выше целям наиболее отвечает проект, представленный в [11]. К основным недостаткам этого проекта относят, прежде всего, недостаточную гибкость входного языка, раздельное решение задач кинематики, статики, динамики и кинетостатики для одного и того же объекта исследования, и другие. Появление систем компьютерной алгебры стимулировало интерес к созданию проблемно-ориентированных комплексов (ПОК) для ПК с целью автоматизации исследований и поиска решений основных задач механики. Тем не менее, из-за существования большого арсенала методов механики, остается неопределенным, какой из методов способен на единой основе автоматизировать процессы составления уравнений движения машин и получать комплексное решение проблем кинематики, статики и динамики. Основные результаты, полученные в этом направлении, представле-

ны в работах [1-11, 13], и относятся к дискретным механическим системам, моделируемым системами твердых тел с упругими, диссипативными, кинематическими и геометрическими связями.

Постановка проблемы. До настоящего времени отсутствует единый подход к созданию САПР в динамике машин, а в существующих разработках используются разные принципы аналитической механики [8]. При компьютерной реализации аналитические преобразования на ПК могут оказаться не эффективными, как, например, при использовании уравнений Лагранжа II рода в исследованиях проблем широкой предметной области динамики машин. Другие классические и оригинальные подходы оказываются более эффективными и могут дать лучшие результаты [1-6, 10]. В работе предложена разработка САПР в динамике машин, основанная на специальной СКА, которая на базе универсального общего вариационного уравнения механики эффективно автоматизирует описание предметной области, задание проблем динамики машин, поиск решений задач анализа и синтеза широкого класса моделей механических систем - дискретных систем твердых тел с (не)стационарными, (не)голономными и (не)удерживающими связями при плоских и пространственных движениях.

Структура, организация и состав специальной СКА обеспечивают реализацию принципа открытости, и использование объектно-ориентированного программирования в среде программирования Borland Builder C++, за счет чего можно удовлетворить требованиям к эффективности ее использования в САПР динамики машин и механизмов. Для ограниченной предметной области исследований динамики машин, моделируемых голономными системами твердых тел с упругими и диссипативными связями, ранее была создана подобная СКА, получившая сокращенное название КИДИМ [1-5]. Опыт использования этой системы в научно-технической и инженерной практике показал, что современные требования к универсальности САПР в динамике машин можно удовлетворить за счет дополнения такой системы современными эффективными методами решения задач анализа и синтеза дискретных механических систем абсолютно твердых тел с (не)голономными, (не)стационарными и (не)удерживающими связями. В работе представлены теория и аналитические алгоритмы построения проблемно-ориентированного комплекса (ПОК) в системе компьютерной алгебры. Даны также общая структура СКА и формализмы языка, состав файла исходных данных и алгоритмы аналитических компьютерных преобразований для САПР в области динамики машин. Эффективность СКА иллюстрирована аналитическими оценками и примерами решенных инженерных задач.

Аналитическое описание механической системы. Рассмотрим голономную механическую систему, составленную из n тел, каждое имеет массу m_i и главные центральные моменты инерции J_{ix}, J_{iy}, J_{iz} . Декартовы координаты центров масс заданы в неподвижной системе координат (СК), а угловые скорости тел - $\omega_{ix}, \omega_{iy}, \omega_{iz}$ заданы их проекциями на главные центральные оси тела. Выберем совокупность обобщенных координат $q = \{q_1, q_2, \dots, q_s\}$, где s - число степеней свободы, относительно которых запишем зависимости декартовых координат N точек (центров масс тел, точек приложения сосредоточенных сил и т.п.) и k углов поворота звеньев системы:

$$\begin{aligned} \xi_i &= \xi_i(q_1, q_2, \dots, q_s, t) = \xi_i(q, t), & i &= 1, 2, \dots, 3N, \\ \varphi_j &= \varphi_j(q_1, q_2, \dots, q_s, t) = \varphi_j(q, t), & j &= 1, 2, \dots, k \end{aligned} \quad (1)$$

где ξ_i – обозначения декартовых координат. Зависимости (1) образуют структуры механической системы [2].

Во многих случаях вместо (1) удобно использовать дифференциальные структуры:

$$\begin{aligned} v_{i\xi} &= v_{i\xi}(q_1, q_2, \dots, q_s, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_s, t) = v_{i\xi}(q, \dot{q}, t), \\ \omega_{i\xi} &= \omega_{i\xi}(q_1, q_2, \dots, q_s, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_s, t) = \omega_{i\xi}(q, \dot{q}, t). \end{aligned} \quad (2)$$

Совокупность инерционных значений (I_j) – массы или осевого момента инерции тела, дифференциальных или геометрических структур назовем инерционным элементом механической модели. При этом структуры могут быть параметризованы по параметрам k_j – координаты инерционного элемента вида (1) или (2).

Для описания сил и пар, действующих на точки системы и тела, введем – силовой элемент [2], включающий характеристики и координаты. Характеристикой силового элемента принимается проекции силы на направление виртуального перемещения точки ее приложения, для пары – проекции ее момента на ось угла поворота тела. Координатами силового элемента принимаются вариации виртуальных перемещений. Для силы – это будет декартова координата точки приложения, для пары – угол поворота тела. Виртуальная работа силы (пары) определится так:

$$\begin{aligned} \delta A_{F_i} &= \vec{F}_i \delta \vec{r}_i = F_{ix} \delta x_i + F_{iy} \delta y_i + F_{iz} \delta z_i, \\ \delta A_{M_i} &= M_{ix} \delta \varphi_{ix} + M_{iy} \delta \varphi_{iy} + M_{iz} \delta \varphi_{iz}. \end{aligned} \quad (3)$$

Обозначая, P_j – характеристики, ρ_j – координаты, p – число силовых элементов, имеем

$$\delta A^a = \sum_{i=1}^p P_i \delta \rho_i. \quad (4)$$

Выражения (3), (4) должны рассматриваться совместно с геометрическими структурами (1), что позволит для сил и пар определить вариации координат в выражениях (4). При использовании дифференциальных структур вида (2), выражения (4) для пар получим с помощью тождества Лагранжа

$$\delta A_{M_i} = \vec{M}_i \delta \vec{\varphi}_i = \vec{M}_i \sum_{k=1}^s \frac{\partial \vec{\varphi}_i}{\partial q_k} \delta q_k = \vec{M}_i \sum_{k=1}^s \frac{\partial \vec{\omega}_i}{\partial \dot{q}_k} \delta q_k.$$

Для описания упругих и диссипативных сил в механической системе используем упругий и диссипативный элементы, виртуальные работы для этих сил запишем так:

$$\delta A^y = \sum_{i=1}^c C_i \gamma_i \delta \gamma_i; \quad \delta A^d = \sum_{i=1}^d D_i \dot{\beta}_i \delta \beta_i. \quad (5)$$

Здесь C_i , D_i – коэффициенты жесткости и диссипации – характеристики, γ_i , β_i – деформации упругих и скорости диссипативных элементов – координаты упругих и диссипативных элементов, c , d – число упругих и диссипативных элементов в системе, соответственно.

Для механических систем, имеющих структуру «дерева», используем объект, называемый «твердое тело». В этот объект составляется из наименования, параметров положения связанной СК относительно локальной СК, ссылок на имя «базового» тела, с которым связана локальная СК, инерционных параметров – массы и главных центральных моментов инерции. Параметры положения связанной СК – это

последовательность элементарных поворотов и сдвигов локальной СК для совмещения ее с СК данного тела. Синтаксис описания такого объекта представляет собой запись вида

$$Name_i [\sim Name_{i-1}] \left[[R(\alpha), [S(d), \dots = [m(m_i), [J_x(J_{ix}), [J_y(J_{iy}), [J_z(J_{iz})], \right. \right. \right] \quad (6)$$

где $Name_i$ - наименование i -го звена; $Name_{i-1}$ - наименование звена, в СК которого определяется положение СК i -го звена, а при отсутствии такого звена считается, что тело связано со стойкой; $[R(\alpha), [S(d), \dots$ - это списки последовательности поворотов ($R(\alpha)$) и смещений ($S(d)$), задающие преобразования СК $(i-1)$ -го тела в СК i -го тела; $[m(m_i), [J_x(J_{ix}), [J_y(J_{iy}), [J_z(J_{iz})]$ - инерционные параметры в главной центральной СК тела.

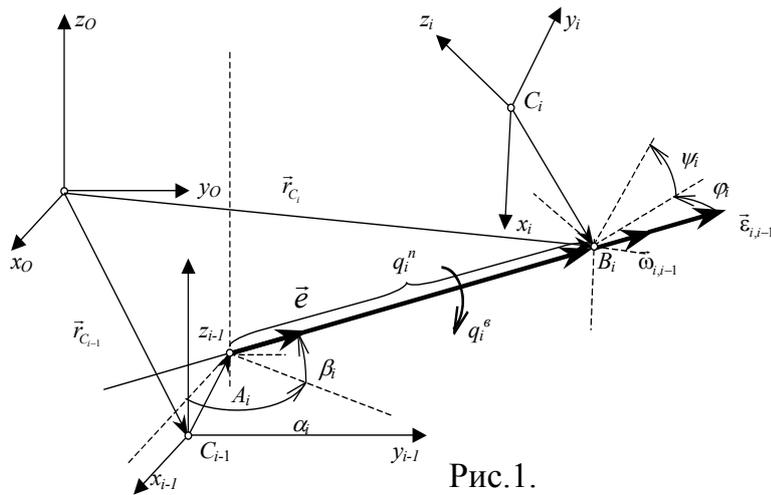


Рис. 1.

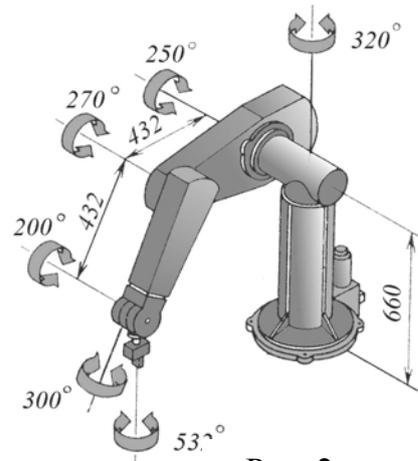


Рис. 2.

На рис.1 показаны $(i-1)$ -я, корневая, и i -я СК манипуляционной системы. Вектор $\overline{A_i B_i}$ - ось кинематической пары, соединяющая тела, причем точки A_i и B_i выбираются так, чтобы легко можно было задать их координаты в СК $(i-1)$ -й и i -й, соответственно, углы, задающие положение этой оси в СК i -й - $\{\varphi_i, \psi_i\}$ и $(i-1)$ -й - $\{\alpha_i, \beta_i\}$, обобщенные координаты (q_i^e, q_i^n) в случае вращательной и поступательной пар.

Описание i -го звена в форме (6) принимает вид:

$$\begin{aligned} \text{Звено}_i \sim \text{Звено}_{i-1} \mid & S_x(x_{A_i}), S_y(y_{A_i}), S_z(z_{A_i}), R_z(\alpha_i), R_y(\beta_i), \\ & R_x(q_i^e \parallel 0), S_x(AB \parallel q_i^n), R_y(\psi_i), R_z(\varphi_i), S_x(-x_{B_i}), S_y(-y_{B_i}), S_z(-z_{B_i}); \end{aligned}$$

Шестизвенный манипулятор Пума (рис. 2.) описывается так:

Колонна	Rz (Fi1) , Sz (h)	=
Jz (J1z) ;		
Плечо~Колонна	Sz (h1) , Ry (Fi2) , Sx (l2) , Sy (-d2)	=
m2 , J2x , J2z , J2y ;		
Локоть~Плечо	Sx (h2) , Ry (Fi3) , Sx (l3) , Sy (d3)	=
m3 , J3x , J3z , J3y ;		
Запястье~Локоть	Sx (h3) , Rx (Fi4)	=
m4 , J4z , J4x , J4y ;		
Ладонь~Запястье	Ry (Fi5)	=
m5 , J5x , J5z , J5y ;		
Схват~Ладонь	Sx (h6) , Rz (Fi6)	=
m6 , J6z , J6x , J6y ;		

Выразим кинематические параметры движения i -го тела через параметры движения $(i-1)$ -го тела:

$$\begin{aligned} \vec{\omega}_{i,i-1} &= \dot{q}_i^s \vec{e}, & \vec{\varepsilon}_{i,i-1} &= (\ddot{q}_i^s \vec{e}) + \vec{\omega}_i \times (\dot{q}_i^s \vec{e}), & \overrightarrow{C_{i-1}C_i} &= \overrightarrow{C_{i-1}A_i} + \overrightarrow{A_iB_i} - \overrightarrow{C_iB_i}, \\ \vec{\omega}_i &= \vec{\omega}_{i-1} + \vec{\omega}_{i,i-1}, & \vec{\varepsilon}_i &= \vec{\varepsilon}_{i-1} + \vec{\varepsilon}_{i,i-1}, & \vec{r}_{C_i} &= \vec{r}_{C_{i-1}} + \overrightarrow{C_{i-1}C_i}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \vec{v}_{nep} &= \vec{v}_{C_{i-1}} + \vec{\omega}_{i-1} \times \overrightarrow{C_{i-1}C_i}, & \vec{v}_{omn} &= (\dot{q}_i^n \vec{e}) - \vec{\omega}_{i,i-1} \times \overrightarrow{C_iB_i}, & \vec{v}_{C_i} &= \vec{v}_{nep} + \vec{v}_{omn}, \\ \vec{a}_{Kop} &= 2\vec{\omega}_{i-1} \times \vec{v}_{omn}, & \vec{a}_{nep} &= \vec{a}_{C_{i-1}} + \vec{\varepsilon}_{i-1} \times \overrightarrow{C_{i-1}C_i} + \vec{\omega}_{i-1} \times \vec{\omega}_{i-1} \times \overrightarrow{C_{i-1}C_i}, \\ \vec{a}_{omn} &= (\ddot{q}_i^n \vec{e}) + \vec{\varepsilon}_{i,i-1} \times \overrightarrow{C_iB_i} - \vec{\omega}_{i,i-1} \times \vec{\omega}_{i,i-1} \times \overrightarrow{C_iB_i}, & \vec{a}_{C_i} &= \vec{a}_{nep} + \vec{a}_{omn} + \vec{a}_{Kop}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для системы n тел, обобщенные силы инерции складываются из обобщенных сил инерции каждого i -го тела, которые можно представить в виде [5]

$$-Q_i^u = \left[\frac{\partial \vec{r}_{C_i}^{(i)}}{\partial q} \right]^T \left(m_i \vec{a}_{C_i}^{(i)} + \vec{\omega}_i^{(i)} \times m_i \vec{v}_{C_i}^{(i)} \right) + \left[\frac{\partial \vec{\omega}_i^{(i)}}{\partial \dot{q}} \right]^T \left(\left[\vec{J}_i^{(i)} \right] \cdot \vec{\varepsilon}_i^{(i)} + \vec{\omega}_i^{(i)} \times \left[\vec{J}_i^{(i)} \right] \cdot \vec{\omega}_i^{(i)} \right). \quad (9)$$

Здесь $q = \{q_i^s || q_i^n\}$, $i = 1, 2, \dots, n$ – вектор обобщенных координат; m_i – масса, $\vec{r}_{C_i}^{(i)}$, $\vec{v}_{C_i}^{(i)}$, $\vec{a}_{C_i}^{(i)}$ – радиус-вектор, скорость и ускорение центра масс; $\vec{\omega}_i^{(i)}$, $\vec{\varepsilon}_i^{(i)}$ – векторы угловой скорости и углового ускорения; $\left[\vec{J}_i^{(i)} \right]$ – тензор инерции i -го тела; матри-

цы $\left[\frac{\partial \vec{r}_{C_i}^{(i)}}{\partial q} \right]$, $\left[\frac{\partial \vec{\omega}_i^{(i)}}{\partial \dot{q}} \right]$, которые называются структурными в [5].

Так как, кинематические параметры, входящие в выражение (9), находятся по рекуррентным зависимостям (7)-(8), то можно оценить число математических операций в (9), в зависимости от количества n тел в системе. Эта оценка дает следующий результат: $n(144 + 3n) \otimes$, $n(109 + 3,5n) \oplus$, который близок к показателю самого эффективного алгоритма Ньютона-Эйлера: $(117n - 24) \otimes$, $(103n - 21) \oplus$, разработанного специально для манипуляционных систем [13]. Заметим, что выбором специальной системы обобщенных координат алгоритм Ньютона-Эйлера [13] можно получить из (9). Для этого все тела надо «освободить», ввести в рассмотрение силы взаимодействия звеньев, тогда структурные матрицы в (9) станут единичными, а в выражении для оценки числа операций пропадут слагаемые с n^2 .

Математическое моделирование на ПК. Принятое выше описание инерционных и силовых свойств механической системы положено в основу создания ПОК, позволяющего за счет использования специализированной системы компьютерной алгебры оптимально организовать входные сведения о механической системе, строить уравнения движения и равновесия, формулировать и решать основные задачи механики для широкого класса механических систем. В СКА аналитически вычисляются производные, входящие в (9) для построения уравнения движения в форме общего вариационное уравнения динамики (принципа Д'Аламбера – Лагранжа):

$$Q_k^u + Q_k = 0, \quad Q_k = \sum_{i=1}^p P_i \frac{\partial \rho_i}{\partial q_k}, \quad k = 1, 2, \dots, s, \quad (10)$$

где обобщенные силы инерции вычисляются по формулам (9), а обобщенные активные силы – по формулам, следующим из (4).

Структура СКА. На рис. 3 представлена общая архитектура программного комплекса с СКА (КИДИМ), предназначенного для моделирования механических систем на базе общего вариационного уравнения механики, для решения задач статики, динамики и кинестатики машин на единой методической основе.

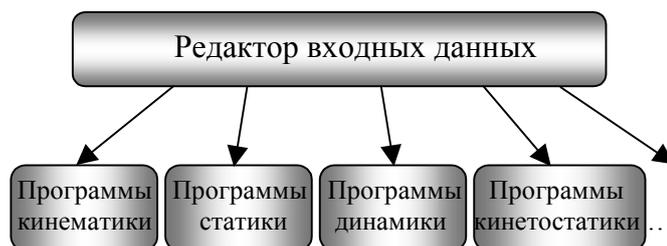


Рис. 3.

Панель редактора исходных данных представлен на рис. 4.

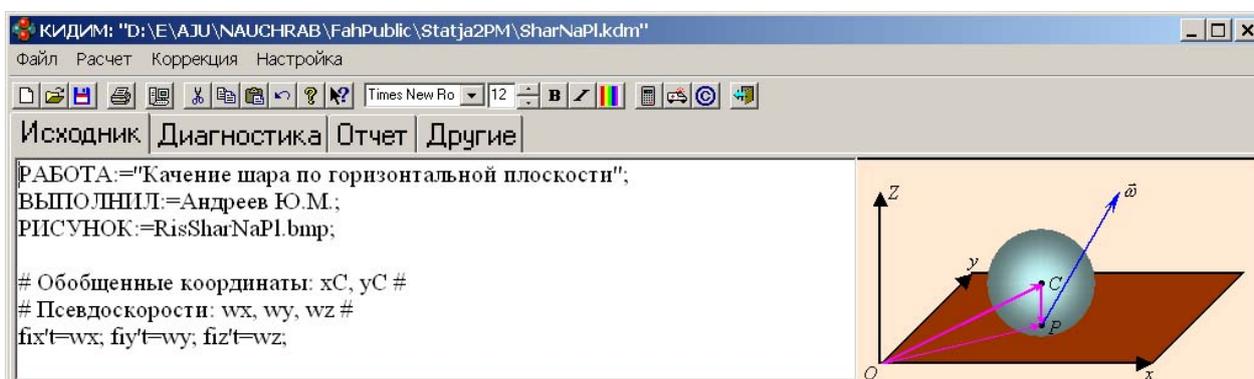


Рис. 4

Редактор входных данных предназначен для подготовки исходных файлов, которые содержат числовую, аналитическую и графическую информацию о модели механической системы, соответственно поставленной проблеме. После подготовки входных данных, редактор обращается к модулю, который выполняет соответствующие расчеты, и в дальнейшем осуществляет управление задачами (вызов других файлов, видоизменение, сохранение исходных данных, формирование отчетов по результатам работ и т.п.). Такая архитектура распараллеливает работы по созданию и усовершенствованию модулей СКА, дополнению его новыми программами для расширения функциональных возможностей СКА.

Модули ПК есть завершенные программы, которые при вызове получают параметр, содержащий имя файла с исходными данными, причем тип расчета задается в этом файле. Каждый модуль начинает свою работу с чтения информации из переданного ему файла, проводит ее диагностику, отображает результаты расчета, формирует отчет, возвращает управление задачами редактору, а при выявлении ошибок выводит об этом сообщения. Для описаний расчетов стационарных, переходных и равновесных режимов механических моделей привлечены следующие структурные единицы входного языка (формализмы): «комментарий», «формула», «элемент», «массив», «инструкция», «оператор», «твердое тело». Все формализмы, кроме комментариев, отделяются символом ';', комментарии – '#...#' или '{...}', последовательность записей несущественна. В программной реализации формализмы представляются одноименными объектами в понимании объектно-ориентированного программирования. Для записи аналитических выражений используются функции (унарные операции) $\sqrt{\quad}$, $\sin(\quad)$, $\cos(\quad)$, $\text{tg}(\quad)$, $\arcsin(\quad)$, $\text{arctg}(\quad)$, $\exp(\quad)$, $\ln(\quad)$, $\text{sh}(\quad)$, $\text{ch}(\quad)$,

arcsinh(), abs(), ipl() (линейная интерполяция), spln() (кубический сплайн) и бинарные операции '+', '-', '*', '/', '^' (возведение в степень), '' (дифференцирование). Формулы представляются в памяти ПК в виде бинарных деревьев, что оптимально для проведения вычислений, дифференцирования и других операций. Для упрощения формул используется представление формул списком слагаемых, каждое из которых есть совокупность знака ('+' или '-') и списка сомножителей.

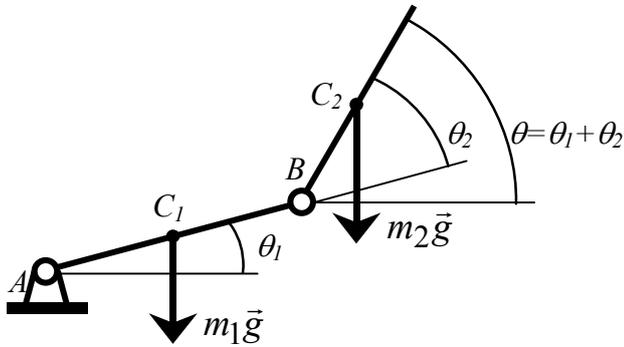


Рис. 5.

В качестве примера аналитических вычислений для составления уравнений динамики рассмотрим двухзвенный манипулятор ([13], с.117), показанный на рис. 5. За обобщенные координаты выберем: θ_1, θ_2 – абсолютный угол поворота первого звена («плеча») и угол относительного поворота второго звена («локтя»). Зададим инерционные элементы: для «плеча» – со значением $m_1 l^2 / 3$ и координатой θ_1 , а для «локтя»

– со значениями $m_2, m_2, m_2 l^2 / 12$ и координатами $x_{C_2} = l(\cos \theta_1 + 0,5 \cos \theta), y_{C_2} = l(\sin \theta_1 + 0,5 \sin \theta), \theta = \theta_1 + \theta_2$. Зададим силовые элементы. Для сил тяжести: «плеча» – со значением $-m_1 g$ и координатой $y_{C_1} = 0,5 l \sin \theta_1$, для «локтя» – со значением $-m_2 g$ и координатой y_{C_2} . Для моментов – со значениями $\tau_1(t), \tau_2(t)$ и координатами θ_1, θ_2 , соответственно. Найдём дифференцированием структурные матрицы инерции и активных сил:

$$S_I = \frac{\partial \{ \theta_1 \quad \theta \quad x_{C_2} \quad y_{C_2} \}}{\partial \{ \theta_1 \quad \theta_2 \}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \\ -l(\sin \theta_1 + 0,5 \sin \theta) & l(\cos \theta_1 + 0,5 \cos \theta) \\ -0,5l \sin \theta & 0,5l \cos \theta \end{bmatrix};$$

$$S_P = \frac{\partial \{ y_{C_1} \quad y_{C_2} \quad \theta_1 \quad \theta_2 \}}{\partial \{ \theta_1 \quad \theta_2 \}} = \begin{bmatrix} 0,5l \cos \theta_1 & 0 \\ l(\cos \theta_1 + 0,5 \cos \theta) & 0,5l \cos \theta \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Тогда уравнения движения в векторно-матричном виде примут вид

$$S_I^T \begin{bmatrix} m_1 l^2 / 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 l^2 / 12 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{x}_{C_2} \\ \ddot{y}_{C_2} \end{bmatrix} - S_P^T \begin{bmatrix} -m_1 g \\ -m_2 g \\ \tau_1(t) \\ \tau_2(t) \end{bmatrix} = 0,$$

где

$$\ddot{x}_{C_2} = -l \{ (\sin \theta_1 + 0,5 \sin \theta) \ddot{\theta}_1 + (\cos \theta_1 + 0,5 \cos \theta) \dot{\theta}_1^2 + 0,5 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos \theta + 0,5 (\ddot{\theta}_2 \sin \theta + \dot{\theta}_2^2 \cos \theta) \},$$

$$\ddot{y}_{C_2} = l \{ (\cos \theta_1 + 0,5 \cos \theta) \ddot{\theta}_1 + (\sin \theta_1 - 0,5 \sin \theta) \dot{\theta}_1^2 - 0,5 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta + 0,5 (\ddot{\theta}_2 \cos \theta - \dot{\theta}_2^2 \sin \theta) \}.$$

Решение задач механики. Основная задача кинематики состоит в определении кинематических параметров движения механической системы по заданным законам

движений исходных звеньев. Для решения этой задачи в СКА достаточно задать законы изменений обобщенных координат во времени: $q = q(t)$. Аналитические вычисления в СКА позволяют построить траектории звеньев, определить их рабочие зоны, скорости и ускорения соответствующих точек, угловых скоростей и ускорений звеньев системы:

$$v_{i\xi} = \sum_{k=1}^s \frac{\partial \xi_i}{\partial q_k} \dot{q}_k + \frac{\partial \xi_i}{\partial t}, \quad a_{i\xi} = \sum_{k=1}^s \left(\frac{\partial \xi_i}{\partial q_k} \ddot{q}_k + \sum_{l=1}^s \left(\frac{\partial^2 \xi_i}{\partial q_k \partial q_l} \dot{q}_k + \frac{\partial^2 \xi_i}{\partial q_l \partial t} \right) \dot{q}_l \right) + \frac{\partial^2 \xi_i}{\partial t^2}, \quad (11)$$

$$\omega_j = \sum_{k=1}^s \frac{\partial \varphi_j}{\partial q_k} \dot{q}_k + \frac{\partial \varphi_j}{\partial t}, \quad \varepsilon_j = \sum_{k=1}^s \left(\frac{\partial \varphi_j}{\partial q_k} \ddot{q}_k + \sum_{l=1}^s \left(\frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial q_k \partial q_l} \dot{q}_k + \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial q_l \partial t} \right) \dot{q}_l \right) + \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial t^2}. \quad (12)$$

Приравнивая обобщенные силы системы (10) нулю, найдем $S_P^T P = 0$, где $S_P = \frac{\partial \rho}{\partial q} = \frac{\partial \{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_p\}}{\partial \{q_1, q_2, \dots, q_s\}}$ - структурная матрица активных сил системы, зависящая от обобщенных координат. Если P – известные силы, то полученная система уравнений используется для определения положений равновесия q_0 . Если P содержит, кроме известных активных сил, неизвестные силы реакций, то это обычные уравнения статики и могут использоваться для нахождения реакций или активных сил, обеспечивающих равновесие.

Похожим образом решаются задачи кинестатики по определению динамических реакций связей. В этом случае строится полное уравнение (10), которое в матричном виде имеет вид $U = \sum_{i=1}^n Q_i^u + S_P^T P = 0$, и приводятся к виду $AR=B$ для нахождения вектора неизвестных сил R . Правая часть такой системы уравнений равна $B = -U|_{R=0}$, а квадратная матрица $A = \frac{\partial U}{\partial R} = \frac{\partial U \partial P}{\partial P \partial R} = S_P^T \frac{\partial P}{\partial R}$ определяется дифференцированием U по вектору неизвестных R . Получить решение удобно путем численного обращения матрицы A на каждом шаге времени из заданного диапазона. По вычисленным числовым значениям элементов матрицы A и вектора B находятся значения вектор-функции $R=R(t)$. Таким же образом, понимая под вектором неизвестных сил R управляющие воздействия на систему, можно решать некоторые задачи управления движением механической системы.

При рассмотрении задач на малые колебания механических систем их уравнения строятся линеаризованными. Линеаризация состоит, прежде всего, в пренебрежении расхождением моментов инерции тел относительно осей связанной и неподвижной СК и отбрасывании в обобщенных силах инерции (9) членов с произведениями угловых скоростей. Аналогично, диссипативные силы соберутся в линейную форму относительно обобщенных скоростей, а упругие - в линейную форму относительно обобщенных координат. Перенесем силовые составляющие в правую часть, получим линейную форму относительно силовых характеристик. Обозначим матрицы этих форм, соответственно, M - инерции, D - диссипации, K - упругости, через $F(t)$ - вектор правой части, получим уравнения вынужденных малых колебаний в матричном виде: $M\ddot{q} + B\dot{q} + Kq = F(t)$.

Ограничиваясь разложением в ряд Фурье правой части, приняв ее произвольной

периодической функцией времени с периодом $T = \frac{2\pi}{\omega}$, и ограничиваясь k гармониками,

запишем $F(t) = \sum_{j=1}^k F_{cj} \cos(j\omega t) + F_{sj} \sin(j\omega t)$. Далее, используя принцип суперпозиции, рассмотрим решения для каждой $F_j(t) = F_{cj} \cos(j\omega t) + F_{sj} \sin(j\omega t)$ в виде

$q_j(t) = q_{cj} \cos(j\omega t) + q_{sj} \sin(j\omega t)$, а окончательно получим

$q(t) = \sum_{j=1}^k q_{cj} \cos(j\omega t) + q_{sj} \sin(j\omega t)$. В комплексной форме уравнения для неизвестных амплитуд принимает вид:

$$\{[K - (j\omega)^2 M] - i(j\omega B) \vec{q}_{cj} + i \vec{q}_{sj}\} = (F_{cj} + i F_{sj}).$$

Так как матрицы M, B, K , входящие в это уравнение симметрические, то и комплексная матрица левой части $A = \{[K - (j\omega)^2 M] - i(j\omega B) \vec{q}_{cj} + i \vec{q}_{sj}\}$ будет симметрической. Наиболее эффективным алгоритмом решения систем линейных алгебраических уравнений с симметрической матрицей является метод треугольного разложения матрицы $A = LL^T$, где L – левая нижняя треугольная матрица (метод Холецкого [12]). Для большей эффективности вычислительного алгоритма все матрицы M, B, K, A, L представляются диагональю и нижним треугольником. Матрицы M, B, K определяются один раз, а в циклах по частоте ω и номеру гармоники j вычисляется матрица A , находится матрица L ее треугольного разложения и по значениям амплитуд косинусной и синусной составляющих возбуждения F_{cj}, F_{sj} определяются амплитуды косинусной и синусной составляющих моногармонического решения q_{cj}, q_{sj} , а по ним – полигармоническое решение.

При отсутствии диссипативных и силовых слагаемых получим уравнения малых свободных колебаний $M\ddot{q} + Kq = 0$, которые после подстановки $q = q_0 \cos \omega t$ принимают алгебраическую форму, а решение задачи представляется в виде: $q_0 = \omega^2 K^{-1} M q_0$. Обобщенная проблема собственных значений и векторов в программном комплексе КИДИМ разрешается методом вращений Якоби. В результате решения находятся не только частоты и формы свободных колебаний, но и по методике [1] определяются коэффициенты влияния инерционных и упругих параметров на собственные частоты системы (функции чувствительности).

Решения инженерных задач. Разработка СКА широко используется для решения инженерных задач. Приведем примеры.

Комплексное исследование жатки хлебобуборочного комбайна. Упрощенная модель жатки дана на Рис.6. Корпус жатки 1 вместе с деталями цепной передачи 2 вывешен на пружинах 3, 4 одинаковой жесткости, которые связаны рычагами 5, 6 с вертикальными тягами BF и DE . Каретка 7 вместе с осью качания O корпуса жатки движется на роликах по раме 8, которая закрепленная на корпусе комбайна. Центр масс жатки S смещен

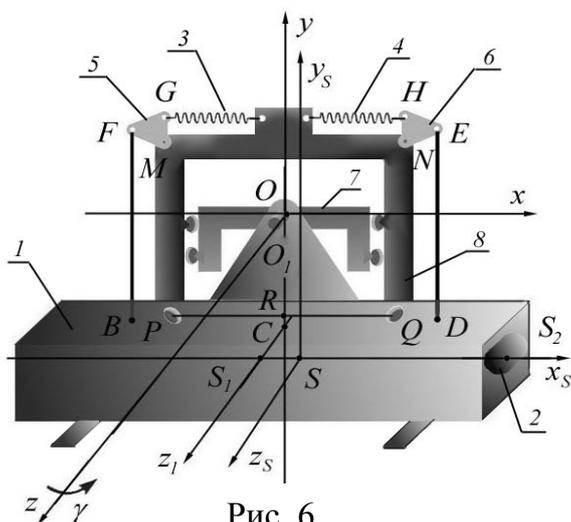


Рис. 6.

на расстояние d от ее геометрического центра S_1 . Жатка касается задней стенкой наклонных подшипников P и Q , и ее ход по вертикали и угол поворота имеют ограничения, соответственно, $y_{Omin} \leq y_O \leq y_{Omax}$, $-\gamma_{max} \leq \gamma \leq \gamma_{max}$.

Решением задачи статики по описанной выше методике определяются силы упругости пружин в заданных крайних вертикальных положениях жатки, а по ним подобраны жесткости пружин.

Затем решена задача о малых свободных колебаниях жатки, сохранив в описании две степени свободы, соответствующие движениям жатки – вертикальному поступательному и вращательному вокруг оси качания. При этом инерционный элемент системы: $\{m, y_O\}$, $\{J_z, \gamma\}$, где m - масса, J_z - осевой момент инерции жатки, а упругие элементы системы: $\{C, \delta_{лев}\}$, $\{C, \delta_{прав}\}$, $\{C_{экр}, \gamma\}$, где C - жесткость пружин, $C_{экр}$ - квазижесткость жатки как физического маятника: $C_{экр} = mgl$, где l – проекция SO на нормаль к оси Ox . Структуры системы: $\delta_{лев} = y_F \cdot i$; $\delta_{прав} = y_E \cdot i$, $i = x_E / y_H$, $y_F = y_O - \gamma \cdot BR$; $y_E = y_O + \gamma \cdot RD$.

Расчетами установлено, что низшая частота жатки – это частота при вращательном движении, а высшая – при поступательном движении. При этом значения частот и форм мало зависят от передаточного числа i . Эти значения пренебрежимо малы по сравнению с частотой вынужденных колебаний жатки, вызванных вибрацией двигателя, или вследствие движения комбайна и лап жатки по неровностям грунта.

В расчетах вынужденных колебаний жатки учтены законы движения точек крепления рычагов N и M : $y_M = y_8 - \varphi_8 \cdot BD / 2$, $y_N = y_8 + \varphi_8 \cdot BD / 2$, $\delta_{лев} = (y_F - y_M) \cdot i$, $\delta_{прав} = (y_E - y_N) \cdot i$. Рассматривалось кинематическое возбуждение за счет колебания корпуса комбайна в вертикальной плоскости (см. рис. 6), причем, принималось, что $y_8 = A_y \sin(\omega t)$, $\varphi_8 = A_\varphi \sin(\omega t)$. В результате установлено, что вынужденные колебания жатки происходят с частотами значительно выше их собственных частот.

Для определения сил, которые возникают при мгновенном подъеме (опускании) одной из лап жатки на кочке (яме), исследованы вынужденные непериодические колебания. В расчетах учтены ограничители, амортизация грунта и деформирование упоров. В упругих и диссипативных элементах системы использованы характеристики упругости грунта в точках контакта лап жатки, коэффициенты внутреннего трения пружин 3, 4, коэффициенты диссипации при вертикальном поступательном и угловом движении жатки и трении роликов каретка-рама, в точках P и Q (рис. 6). Обобщенными координатами приняты ординаты лап: $y_{лев}$, $y_{прав}$, так что структуры системы

представлены в виде: $y_O = (y_{\ddot{a}\ddot{a}}(t) + y_{i\delta\ddot{a}\ddot{a}}(t)) / 2$,
 $\gamma = (y_{прав}(t) - y_{лев}(t)) / a$.

Реакции рамы 8 вдоль осей Ox и Oz , реакции наклонных роликов в точках P и Q и вертикальные реакции грунта на лапы жатки определены кинетостатическими расчетами. С этой целью в систему введены дополнительные степени свободы и обобщенные координаты - $y_{лев}$, $y_{прав}$, x_O , z_O , α и β - углы поворота жатки вокруг осей Ox и Oy , законы изменения которых приняты по данным расчетов жатки при вынужденных колебаниях и переходных режимах. Структуры системы, силовые и

инерционные элементы принимались в виде:

$$x_S = x_O + \gamma \cdot CO + \beta \cdot CS_1, \quad y_S = y_O - CO + \gamma d - \alpha CS_1, \quad z_S = z_O - \alpha \cdot CO - \beta \cdot d,$$

$$z_P = z_P - \alpha \cdot RO + \beta \cdot PQ/2, \quad z_Q = z_O - \alpha \cdot RO - \beta \cdot PQ/2.$$

$$\{mg, y_S\}, \{Z_P, z_P\}, \{Z_Q, z_Q\}, \{X_O, x_O\}, \{Z_O, z_O\}, \{Y_{лев}, y_{лев}\}, \{Y_{прав}, y_{прав}\};$$

$$\{m, x_S\}, \{m, y_S\}, \{m, z_S\}, \{J_z, \gamma\}.$$

По результатам расчетов установлено, что наибольшее значение реакции грунта на жатку имеет место при наезде на кочку поля одной лапой и угловом качании жатки.

Задачи виброизоляции ДВС. Целью исследования являлось определение упругих и диссипативных характеристик виброизоляторов двигателя, установленного в корпусе транспортного средства, которыми обеспечиваются минимальные реакции основания.

Исследования проводились для 8-цилиндрового четырехтактного V-образного дизеля 8V0700П с двумя шатунами на одной шейке с углом развала цилиндров 90°. Порядок работы цилиндров 1-5-7-2-6-3-4-8. Двигатель установлен на раме промышленного трактора (рис. 7) на четырех упругих опорах – две из них крепятся непосредственно к корпусу машины, а две другие соединяются с балкой, в свою очередь, также закрепленной на упругих опорах. Особенностью модели является то, что упругие элементы, соединяющие двигатель с балкой установлены под углом.

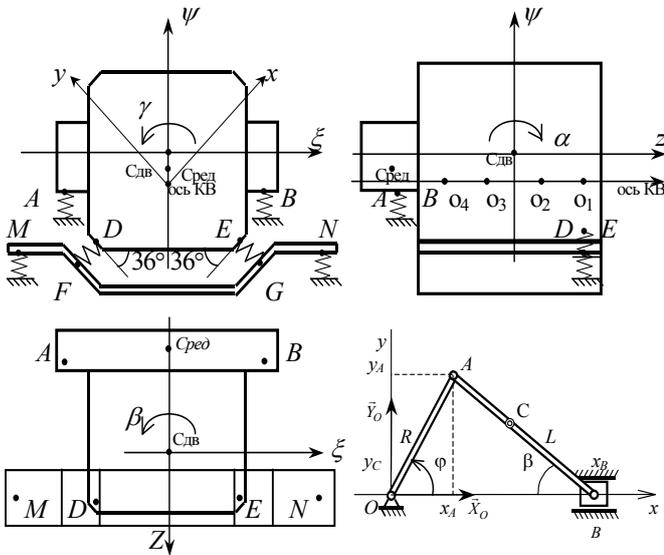


Рис. 7.

Для решения этой задачи предварительно определены собственные частоты и формы колебаний системы, коэффициенты чувствительности [1] жесткостных параметров виброизоляторов, определены возмущающие силы, которыми являются силы инерции кривошипно-шатунных механизмов (КШМ) двигателя. В расчетах вынужденных колебаний корпуса двигателя определены силы, передающиеся на корпус машины. В исследованиях принималось, что двигатель и балка абсолютно твердые тела, а корпус машины - неподвижный. Двигатель имеет шесть степеней свободы, а балка только пять, так как у нее не учитывается поворот вокруг продольной оси из-за ее малой ширины. Обобщенными координатами приняты декартовы координаты ξ, ψ и z центров масс двигателя и балки, а также углы поворота двигателя и балки α, β и γ вокруг осей ξ, ψ и z соответственно. Для задания сил инерции дополнительно вводятся также оси x и y , повернутые относительно осей ξ и ψ на угол 45°.

Для определения сил инерции достаточно задать структуру только одного КШМ, распространив полученные силы на остальные опоры с учетом порядка работы цилиндров. Кинематическая модель КШМ одного цилиндра двигателя представлена на рис. 7. Инерционные элементы, задающие массы поршня и шатуна, а также момент инерции шатуна, представляют собой:

$$\{m_n, x_B\}, \{m_{ш}, x_C\}, \{m_{ш}, y_C\}, \{J_{ш}, \beta\}.$$

Силы давления газов являются внутренними, а моменты сил инерции деталей

КШМ относительно оси коленчатого вала (КВ) уравновешены, поэтому в расчете они не учитываются. Искомыми являются силы давления на опоры, для описания которых введены обобщенные координаты: φ, x_O, y_O , силовые элементы: $\{X_O, x_O\}, \{Y_O, y_O\}$. Координаты x_O и y_O принимались равными постоянным и введены для того, чтобы определить реакции \vec{X}_O, \vec{Y}_O , освободив систему от связей. Структуры принимались в виде:

$$x_A = x_O + R \cos \varphi; y_A = y_O + R \sin \varphi; \beta = \arcsin(y_A/L);$$

$$x_B = x_A + L \cos \beta; x_C = x_A + AC \cos \beta; y_C = y_O - AC \sin \beta.$$

Режим работы двигателя в расчетах устанавливался варьированием оборотов n об/мин коленчатого вала двигателя, вращающегося с постоянной угловой скоростью: $\varphi = \omega t; \omega = \pi n/30$.

Динамические уравнения движения модели КШМ при малых пространственных колебаниях двигателя и рамы на упругих опорах построены автоматизировано в СКА.

Структуры системы, инерционные и упругие элементы приняты в виде :

$$z_{C\delta\dot{a}\ddot{a}} = z_{C\ddot{a}\dot{a}}; \quad \xi_{C\delta\dot{a}\ddot{a}} = \xi_{C\ddot{a}\dot{a}} - \beta_{\ddot{a}\dot{a}} \cdot 1,0 + \gamma_{\ddot{a}\dot{a}} \cdot 0,27; \quad \psi_{C\delta\dot{a}\ddot{a}} = \psi_{C\ddot{a}\dot{a}} - \alpha_{\ddot{a}\dot{a}} \cdot 0,27,$$

$$\{m_{\text{дв}}, \xi_{C\delta\dot{a}\ddot{a}}\}, \{m_{\text{дв}}, \psi_{C\delta\dot{a}\ddot{a}}\}, \{m_{\text{дв}}, z_{C\delta\dot{a}\ddot{a}}\}, \{m_{\text{ред}}, \xi_{C\text{ppe}}\}, \{m_{\text{ред}}, \psi_{C\text{ppe}}\}, \{m_{\text{ред}}, z_{C\text{ppe}}\},$$

$$\{m_{\text{ред}}, \xi_{C\bar{b}}\}, \{m_{\text{ред}}, \psi_{C\bar{b}}\}, \{m_{\text{ред}}, z_{C\bar{b}}\}, \{J_{\beta\bar{b}}, \beta_{C\bar{b}}\}, \{J_{\gamma\bar{b}}, \gamma_{C\bar{b}}\}, \{m_{\bar{b}}, \xi_{C\bar{b}}\},$$

$$\{m_{\bar{b}}, \psi_{C\bar{b}}\}, \{m_{\bar{b}}, z_{C\bar{b}}\}, \{J_{\text{дв}\alpha}, \alpha_{\text{дв}}\}, \{J_{\text{дв}\beta}, \beta_{\text{дв}}\}, \{J_{\text{дв}\gamma}, \gamma_{\text{дв}}\},$$

$$\{C_{1\text{сж}}, \psi_A\}, \{C_{1\text{сж}}, \psi_B\}, \{C_{1\text{сдвиг}}, \xi_A\}, \{C_{1\text{сдвиг}}, \xi_B\}, \{C_{1\text{сдвиг}}, z_A\}, \{C_{1\text{сдвиг}}, z_B\},$$

$$\{C_{2\text{сж}}, u_{DF}\}, \{C_{2\text{сж}}, u_{EG}\}, \{C_{2\text{сдвиг}}, v_{DF}\}, \{C_{2\text{сдвиг}}, v_{EG}\}, \{C_{2\text{сдвиг}}, z_{DF}\}, \{C_{2\text{сдвиг}}, z_{EG}\},$$

$$\{C_{3\text{сж}}, \psi_M\}, \{C_{3\text{сж}}, \psi_N\}, \{C_{3\text{сдвиг}}, \xi_M\}, \{C_{3\text{сдвиг}}, \xi_N\}, \{C_{3\text{сдвиг}}, z_M\}, \{C_{3\text{сдвиг}}, z_M\}.$$

Выводы и направления дальнейших исследований. Предложен единый подход к созданию САПР в динамике машин, для реализации которого создана специальная СКА. Система включает универсальный язык описания механических моделей и задач, систему чтения, преобразования аналитической информации из входного файла, получения уравнений математической модели в аналитическом виде, блок численных расчетов, модуль представления выходных данных. В статье представлены решения комплексных задач расчетов жатки хлебоуборочного комбайна и виброизоляции ДВС.

Применение специальной СКА в КИДИМ подтверждает эффективность принятого подхода. В дальнейшем предполагается расширение такой системы за счет дополнения современными эффективными методами решения задач анализа и синтеза дискретных механических систем абсолютно твердых тел с (не)голономными, (не)стационарными и (не)удерживающими связями.

Предложенные теория и аналитические алгоритмы построения проблемно-ориентированного комплекса (ПОК) в системе компьютерной алгебры, общая структура СКА и формализмы языка, состав файла исходных данных и алгоритмы аналитических компьютерных преобразований для САПР в области динамики машин, могут быть применены и в других системах компьютерной алгебры.

Литература: 1. Андреев Ю.М., Штейнвольф Л.И. Синтез нелинейных вибрационных систем по скелетным кривым с использованием теории чувствительности //Динамика и прочность машин. – 1984. – Вып. 40. С. 50-56. 2. Андреев Ю.М., Штейнвольф Л.И. Компьютерное моделирование задач

механики голономных систем твердых тел со стационарными и нестационарными связями //Динамика и прочность машин. – 1993. – Вып. 53. С. 96-102. 3. Андреев Ю.М., Штейнвольф Л.И. Компьютерное построение дифференциальных уравнений движения неголономных систем //Динамика и прочность машин. – 1993. – Вып. 54. С. 93-98. 4. Андреев Ю.М. Универсальный алгоритм решения задач кинестатики и его применение для расчетов порталного крана //Труды 6-й Международной научно-технической конференции «Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве». - ХНПК «ФЭД». - Харьков, 2002, С. 297-300. 5. Андреев Ю.М. Эффективность компьютерного построения моделей кинематики и динамики манипуляционных систем //Вестник Национального Технического Университета «Харьковский политехнический институт» Сб. науч. трудов, Тематический выпуск: Динамика и прочность машин. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2004. – №19. С. 13-17. 6. Величенко В.В. Матрично-геометрические методы в механике с приложениями к задачам робототехники. – М., 1988. – 274 с. 7. Вукобратович М., Стокич Д. Управление манипуляционными роботами: теория и приложения. – М.: Наука, главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 384 с. 8. Грошева М.В., Ефимов Г.В. О системах аналитических вычислений на ЭВМ //Пакеты прикладных программ. Аналитические преобразования. – М., 1988. – С.5-30. 9. Ермаков Б.Е. Метод постоянных скоростей в задачах механики. – М., 2000. – 152 с. 10. Коноплев В.А. Матричная форма уравнений движения свободного твердого тела. – Сборник научно-методических статей по теоретической механике. М., 1984, вып. 15. С. 118-123. 11. 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>>. 12. Уилкинсон Дж., Райнш К. Справочник алгоритмов на языке АЛГОЛ. – М.: Машиностроение, 1976. – 389 с. 13. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. М.: Мир. 1989. 624 с.

УДК 539.3

О ПРИМЕНИМОСТИ УПРОЩЕННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Чернобрывко М.В., канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)

The problem of adequacy of mathematical models to real process of a straining of design elements which are subject to action of an impulse loading of mechanical character is considered. Effect of an adiabatic increase of temperature in zones of the big plastic deformations on a design value of strain intensity is studied. The comparative analysis of calculation for various mathematical models is reduced.

Расчет конструкций при импульсном деформировании, наравне с экспериментальными исследованиями, является одним из основных средств определения прочностных свойств готовых конструкций, моделирования новых и оценки сохранения целостности конструктивных элементов при аварийных режимах эксплуатации. Нужно заметить, что проведение экспериментальных исследований трудоемко и дорогостояще, поэтому предпочтительно его заменять математическим моделированием. Однако, моделирование способно сократить количество экспериментов лишь в случае адекватности применяемой математической модели реальному физическому процессу.

В общей постановке динамическая задача термоупругопластического деформирования конструкционного элемента под действием импульсного нагружения нелинейная как физически, так и геометрически [1,2]. Применение таких математических моделей приводит к сложностям, а порой и невозможности аналитического решения. А численное решение такой задачи громоздко, его сходимость не всегда воз-

можно обеспечить, а полученные результаты нередко не удовлетворяют заданной точности. Используемые упрощения, линеаризованные законы и полилинейные зависимости, эмпирические формулы и экспериментальные аппроксимации заведомо ведут к погрешности решения. Эта погрешность может достигать 10% - 15% в зонах больших пластических деформаций, что недопустимо при инженерных расчетах. Таким образом, в каждой конкретной задаче вопрос применимости используемой математической модели остается открытым и требует дополнительного исследования.

В связи со сказанным следует обратить внимание на тот факт, что нелинейности геометрического и физического типов можно считать несвязанными между собой. Поэтому, при проведении прочностных расчетов целесообразно идентифицировать процесс деформирования по одному из четырех типов: линейные физически и геометрически; нелинейные физически, но линейные геометрически; линейные физически, но нелинейные геометрически; нелинейные физически и геометрически. Такая классификация позволяет упростить математическую постановку, сохраняя при этом заданную точность решения.

Геометрическую нелинейность можно учитывать в виде следующей зависимости:

$$ds_*^2 - ds^2 = 2(\varepsilon_{xx}dx^2 + \varepsilon_{yy}dy^2 + \varepsilon_{zz}dz^2 + \varepsilon_{xy}dxdy + \varepsilon_{xz}dxdz + \varepsilon_{yz}dydz), \quad (1)$$

где ds^2 и ds_*^2 - квадрат расстояния между двумя заданными точками до и после деформации соответственно.

При обработке экспериментальных данных по определению динамических свойств материала учет геометрической нелинейности крайне важен. Рассматриваются цилиндрические образцы для динамических испытаний на сжатие из стали 34GS. На рис.1 показано различие между расчетными данными, полученными по линейной и нелинейной геометрическим зависимостям. Увеличение длины образца до 6 см ведет к различию в расчетных данных до 3,5 %, что недопустимо при обработке экспериментальных данных.

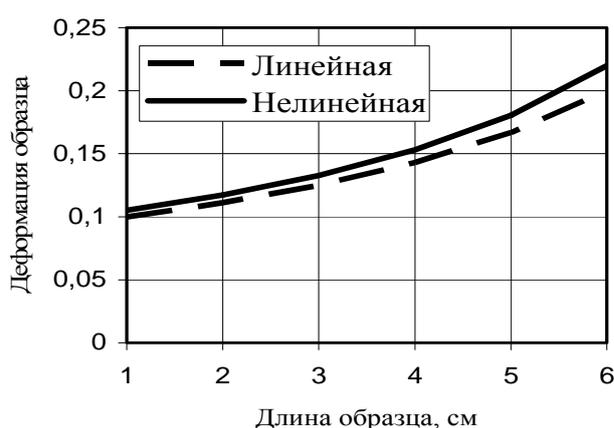


Рис.1. Деформация образцов различной длины при скорости деформации $3 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ для стали 34GS.

Моделирование процессов деформирования многослойных металлических конструкций при воздействии на них импульсных нагрузок механического и температурного характера связано с необходимостью учета физической нелинейности. Экспериментально установлено существование зависимости механических параметров материала конструкции от температуры и скорости деформации. В частности, высокоскоростное деформирование под действием импульсной механической нагрузки ведет к повышению

его предела прочности, а адиабатическое повышение температуры в результате пластического деформирования вызывает разупрочнение металла. Таким образом, исследование напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов

связано с необходимостью отыскания напряжения σ , как функции времени t , деформации ε , ее скорости $\dot{\varepsilon}$ и температуры T : $\sigma = \sigma(t, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$ [7].

В качестве объекта исследования выбраны стальные конструкционные элементы цилиндрической формы, состоящие из двух слоев неразрывно связанных между собой. При этом решение включает анализ процесса деформирования и выбора вида физического закона. Таким образом, в процессе решения возникает необходимость рассмотрения многослойной оболочки. В каждом слое k определена функция $\sigma_k = \sigma_k(t, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$. Вид функций находим путем построения эмпирических зависимостей по данным эксперимента. На границе слоев выполнено условие неразрывности: $\sigma_k|_{\Gamma} = \sigma_{k+1}|_{\Gamma}$.

Анализ этих результатов показывает, что оптимальным следует считать выбор двумерной математической модели упругопластического цилиндрического слоя, учитывающей влияние скорости деформации на величину предела пластичности, а также влияние температурных напряжений.

Литература: 1. Новожилов в.В. Основы нелинейной теории упругости. – Ленинград: ОГИЗ, 1948. – 211 с. 2. Бизюк А.В., Чернобрышко М.В., Ярещенко В.Г. Оценка достоверности математических моделей в задачах высокоскоростного термокинетического деформирования элементов конструкций цилиндрической формы. // Вестник нац. тех ун-та "ХПИ", Серия "Динамика и прочность машин". – Харьков. – 25'2001. – С.39 – 41. 3. Meyers M.A. Dynamic behavior of materials. – New York: Wiley, 1994. – 283 p. 4. Степанов Г.В. Упруго-пластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок. – К.: Наук. думка, 1979. 5. Воробьев Ю.С., Колодяжный А.В., Севрюков В.И., Янютин Е.Г. Скоростное деформирование элементов конструкций. - Киев: Наук. думка, 1989. - 192 с. 6. Kruszka L., Nowacki W.K. Thermoplastic analysis of normal impact of long cylindrical specimen: experiment and comparison with the numerical calculation // J. of Thermal stresses. – Francis, 1995. – pp. 313 - 334. 7. Vorobiev Yu. S., Chernobryvko M.V. Nonlinear high-strain-rate elastic-plastic deformation of structural elements under impulsive loading // The Int. Conf. on Non-linear Dynamics, Kharkov, September 14-16, 2004, pp. 164-167.

УДК 621.81:539.4; 678.5-419

ОСОБЕННОСТИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРОЧНОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ БАЛЛОНОВ

Милешкин М.Б., канд. техн. наук, Библик И.В., Алексеева А.М.

(г. Харьков, Украина)

The basic problems of an estimation of strength reliability of the combined cylinders are considered. Approaches to strength diagnostics by the method of acoustic emission are analyzed and criteria are considered.

Комбинированные баллоны относятся к числу необходимых элементов многих технических систем и представляют собой важный класс объектов повышенной опасности, поэтому работы по улучшению их характеристик и технологии производства приобретают в настоящее время особую актуальность.

Комбинированный баллон представляет собой лайнер (внутреннюю герметизирующую оболочку), обмотанный по цилиндрической части или по всей поверхности полимерным композиционным материалом (ПКМ).

Прочностная диагностика основана на прогнозировании разрушения. Очевидно, что наиболее эффективными могут быть только те методы, которые непосредственно определяют в данном конкретном изделии его служебные характеристики.

Одним из таких методов диагностики применительно к ПКМ может являться метод акустической эмиссии (АЭ).

Лейнер для комбинированных баллонов обычно изготавливается из резины, полиэтилена, нержавеющей стали и алюминиевых сплавов. Прочностная количественная АЭ-диагностика комбинированных баллонов, по-видимому, возможна только на основе оценки характеристик процесса разрушения оболочки из ПКМ, однако наличие лейнера может «затенить» истинную картину процесса разрушения ПКМ, при этом вклад в АЭ могут дать только металлические лейнеры. Что касается лейнеров из резины и полиэтилена, то вопросы прочностной диагностики комбинированных баллонов с такими лейнерами были решены ранее [1]. Поэтому при разработке рекомендаций по диагностике прочности комбинированных баллонов с металлическим лейнером в первую очередь необходимо рассмотреть вопрос о возможности подавления сигналов АЭ от лейнера.

Кратко рассмотрим некоторые подходы к подавлению сигналов АЭ от металлического лейнера.

1. Технологический подход. Подход базируется на эффекте Кайзера. Если до процесса намотки металлическую оболочку подвергнуть нагружению внутренним давлением, то при последующем нагружении уже комбинированного баллона металлический лейнер продеформируется дополнительно еще как минимум на 1-2 % (при меньших деформациях применение ПКМ нецелесообразно). Поэтому в принципиальном плане применение этого подхода не приведет к полному исчезновению сигналов АЭ от металлического слоя при контрольно-технологических испытаниях (КТИ) – автофреттаже, испытании пробным давлением или освидетельствовании. В то же время, предварительное деформирование металлического слоя не может рассматриваться в отрыве от назначения и технологических возможностей изготовления. Поэтому применение технологического подхода, несмотря на его перспективность с точки зрения ослабления АЭ от металлического слоя, нельзя рекомендовать без комплексного анализа условий изготовления и эксплуатации изделий.

2. Аппаратурный подход. В основе подхода лежит возможность разделения сигналов АЭ от процессов деформации и разрушения по амплитудно-частотным или другим характеристикам. Хотя теоретическая возможность такого разделения не исключается, нет оснований говорить о ее возможной однозначной практической реализации. В каждом конкретном случае необходимо проведение предварительных исследований.

3. Механический подход. Подход основан на особенностях отражения параметрами АЭ реального механического поведения материалов. Для этого могут служить зависимости параметров АЭ от степени деформации материала, скорости и режима нагружения.

Технологический и аппаратурный подходы будут эффективны в условиях монолитности металлического слоя (слой должен находиться в состоянии упругой или пластической деформации или в состоянии разрушения на его докритической стадии). Механический подход может быть надежно реализован только при нагружении с достаточно высокой скоростью в ступенчатом режиме. Физической основой этой реализации является наличие вязкоупругой деформации ПКМ. Если комбинированный баллон будет нагружаться с определенной скоростью до некоторой нагрузки и выдерживаться при ней определенное время, то при активном нагружении основными источниками АЭ будут пластическая деформация металлического

слоя и процесс разрушения ПКМ, протекающий в рамках макроупругого деформирования ПКМ. При переходе к режиму постоянной нагрузки АЭ от металлического слоя исчезнет практически мгновенно, а АЭ от слоя ПКМ может продолжаться значительное время, определяемое последующим перераспределением напряжений и образованием дополнительных микроразрывов, т.е. на выдержке АЭ будет характеризовать только механическое поведение ПКМ.

При оптимально выбранном режиме нагружения (скорость нагружения, величина ступени, время выдержки) зависимость числа импульсов АЭ на выдержке от параметра нагружения не только качественно характеризует механизм разрушения слоя ПКМ, но может использоваться и для прочностной диагностики [2,3].

Кратко рассмотрим основные критерии прочностной диагностики и возможности их применения для комбинированных баллонов на всех стадиях их жизненного цикла.

1. Регистрация АЭ за весь цикл КТИ. Количественными характеристиками такой оценки могут служить сумма импульсов АЭ, угол наклона зависимости активности АЭ от нагрузки и др. Этот подход обоснован только в случае, если за весь цикл КТИ ведущий вид разрушения ПКМ [1] не изменяется (хотя известно [1,3], что в оболочках из ПКМ он изменяется).

2. Оценка процесса разрушения на отдельном этапе КТИ. Количественной характеристикой может служить сумма импульсов АЭ. Такой подход необходим, если в процессе нагружения происходит изменение ведущих видов разрушения. Диагностика должна проводиться по результатам измерения АЭ на этапах с одинаковым ведущим видом разрушения, причем должен быть выявлен этап разрушения, максимально влияющий на прочность.

Практически оба вышеперечисленных подхода с точки зрения методологии контроля идентичны. Предварительно должен быть изучен механизм разрушения, затем необходимо выбрать этапы КТИ для измерения АЭ и получить базу данных при разрушающих испытаниях. При контроле необходимо регистрировать активность АЭ. Подходы применимы как при непрерывном, так и при ступенчатом нагружении. Возможность применения максимально упрощенной системы регистрации АЭ является несомненным достоинством этих подходов. Основные же недостатки являются общими для всех методов абсолютного определения характеристик АЭ. Это необходимость идентичности приемных преобразователей, электронных трактов, способов установки и калибровки приемных преобразователей, а также необходимость получения для контролируемых изделий набора данных по результатам разрушающих испытаний.

3. Оценка относительного изменения скорости процесса разрушения при переходе от режима активного нагружения к выдержке под постоянной нагрузкой. Для реализации этого подхода необходима соответствующая система нагружения (переход к режиму постоянной нагрузки должен быть достаточно четким) и аппаратура АЭ, регистрирующая в цифровой форме активность АЭ. Подход может быть реализован только при подавлении сигналов АЭ от металлического слоя. Несомненными преимуществами являются: относительность измерений (упрощаются требования к измерительному тракту); для получения диагностической зависимости можно ограничиться только модельными объектами небольших размеров; диагностическая зависимость может быть получена по результатам разрушающего испытания только одного изделия и использована для всех однотипных изделий (независимо от их

размера), имеющих сходный механизм разрушения; возможность проведения прочностной диагностики изделий после любых неконтролируемых воздействий, в том числе и эксплуатационных, т.е. возможно периодическое освидетельствование изделий.

Таким образом, если реализован способ подавления сигналов АЭ от металлического слоя, то наиболее перспективным является применение АЭ-критерия, основанного на измерении относительного изменения скорости разрушения при упругом последствии в ПКМ. В противном случае может быть реализован второй подход, т.е. регистрация параметров АЭ на выдержках при ступенчатом нагружении. Методология такой прочностной диагностики достаточно разработана [3, 4], необходима лишь ее адаптация к испытываемым объектам.

Литература: 1. Милешкин М.Б. Физические основы акустико-эмиссионной диагностики прочности изделий из полимерных композиционных материалов/Милешкин М.Б., Библик И.В.//Труды МНТК «Соврем. приборы, материалы и технологии для техн. диагностики и неразруш. контроля пром. оборуд.». - Харьков, 1998. - С. 111-118. 2. Милешкин М.Б., Музыка Е.И., Библик И.В. Способ определения прочности изделий / А.с. № 1295271, БИ №9, 1987. 3. Милешкин М.Б. Основные аспекты применения акустико-эмиссионных критериев диагностики прочности изделий из полимерных композитов / Милешкин М.Б., Библик И.В. // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве: Труды 5-й МНТК. - Харьков: ХНПК "ФЭД", 2002.- С. 568-571. 4. Милешкин М.Б. Диагностика прочности элементов летательных аппаратов из полимерных композитов на основе использования метода акустической эмиссии / Милешкин М.Б., Библик И.В. // Матеріали VI МНТК „АВІА 2004”.– К.: НАУ, 2004.-Т. 3.- С. 36.32 - 36.35.

УДК 621.81: 539.4; 621.643/.644; 678.5-419

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ПРОЧНОСТИ РЕМОНТНЫХ МУФТ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

**Милешкин М.Б., канд. техн. наук, Библик И.В., Мамин Г.И., канд. техн. наук
(г. Харьков, Украина)**

The opportunity of application of relative acoustic emission criterion for strength diagnostics of ring samples and sleeve reinforcement system from polymeric composite materials is considered. Satisfactory results are received.

Повышение несущей способности отдельных участков трубопроводов, имеющих различные виды дефектов, может быть осуществлено способом формования на поверхность труб высокопрочной стеклопластиковой оболочки – ремонтной муфты типа "часовая пружина" ("Clock Spring"). Стеклопластиковая оболочка является высококачественным изоляционным покрытием и конструкционным элементом, несущим часть нагрузки от внутреннего давления в трубопроводе.

Целью настоящей работы является исследование возможности контроля и диагностики системы труба – муфта методом акустической эмиссии (АЭ).

Вначале рассмотрим изменение параметров АЭ при нагружении органо-пластиковых (связующее – ЭДТ-10, наполнитель – ЖСВМ) кольцевых образцов. Образцы изготавливались намоткой жгута ЖСВМ-У, внутренний диаметр кольца составлял 150 мм, ширина – 10 мм, средняя толщина – 2,5 мм. Нагружение органо-пластиковых колец осуществлялось при помощи жестких полудисков. Регистрация сигналов АЭ осуществлялась макетом аппаратуры АЭ М400, работающей в режиме восьмиканального амплитудного анализатора с ЭВМ на линии. В каче-

стве информативных параметров АЭ были выбраны скорость счета АЭ и (или) активность АЭ.

На рис. 1 приведена зависимость активности АЭ от нагрузки при ступенчатом нагружении кольцевых образцов, которая является типичной для механического поведения полимерных композиционных материалов (ПКМ) и связана с вязкоупругими свойствами матрицы [1].

Ступенчатое нагружение кольцевых образцов производилось также с целью определения относительного акустико-эмиссионного критерия K_N [2]. На рис. 2 показана зависимость критерия K_N от величины относительной нагрузки (отношение нагрузки, при которой производилась выдержка для определения K_N к разрушающей нагрузке). Видно, что для кольцевых образцов наблюдается хорошая корреляция между относительным АЭ-критерием и относительной нагрузкой.

Оценка возможности проведения АЭ-диагностики прочности муфт из ПКМ проводилась с использованием специального РЭМ [3]. Как было показано ранее [3], специальный РЭМ позволяет моделировать АЭ-поведение полимерных композитов и получать расчетные значения относительного АЭ-критерия K_N , хорошо согласующиеся с экспериментальными. В связи с этим представляло интерес провести аналогичные расчеты для ремонтных муфт из ПКМ.

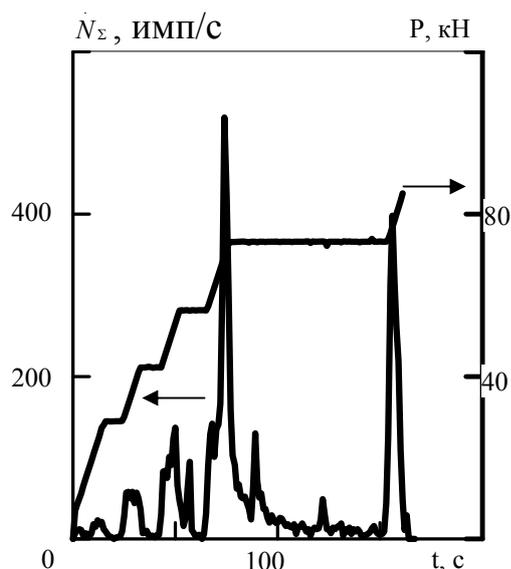


Рис. 1.

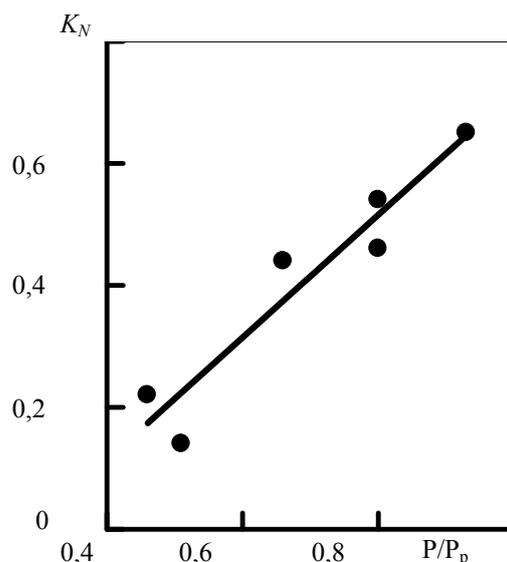


Рис. 2.

Расчеты проводились для трубопровода диаметром 1420 мм с толщиной стенки трубы 14 мм, толщина муфты из стеклопластика составляла 16 мм. При наличии в трубопроводе дефекта, его глубина изменялась от 0 до 0,3 от толщины стенки трубы. На рис. 3 приведен характер изменения рассчитанной с помощью РЭМ «активности АЭ» (изменения числа разрушенных структурных элементов) во времени. Напряжение выдержки составляло 85,1 МПа. Видно, что зависимость также имеет традиционный для ПКМ вид и в принципиальном плане должна позволить определить расчетный относительный АЭ-критерий.

Для определения расчетных значений относительного АЭ-критерия K_N проводилось «ступенчатое нагружение» муфт с двумя выдержками – при 85 и 95 МПа.

N

K_N

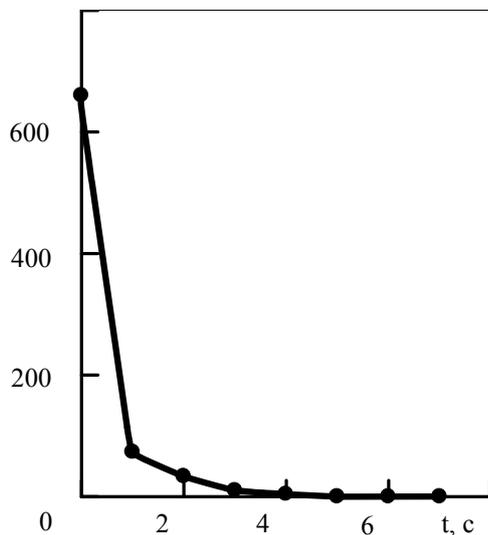


Рис. 3.

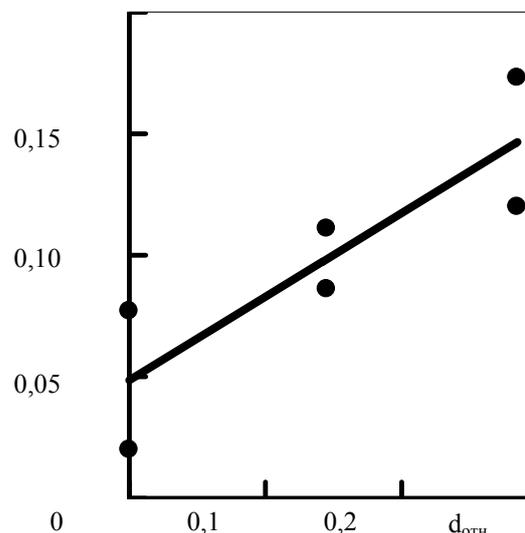


Рис. 4.

На рис. 4 приведена связь расчетных значений K_N с относительной глубиной дефекта. Верхние точки соответствуют выдержке при напряжении 95 МПа, нижние – при напряжении 85 МПа. Видно, что по известному значению K_N можно судить о наличии и размере дефекта в стенке трубопровода, а следовательно и определять его усталостную долговечность (с помощью специального РЭМ), аналогично результатам, приведенным в [4].

Литература: 1. Милешкин М.Б. Физические основы акустико-эмиссионной диагностики прочности изделий из полимерных композиционных материалов / Милешкин М.Б., Библик И.В. // Труды МНТК «Современные приборы, материалы и технологии для техн. диагностики и неразр. контр. пром. оборуд.». - Харьков, 1998. - С. 111–118. 2. Милешкин М.Б., Музыка Е.И., Библик И.В. Способ определения прочности изделий / А.с. № 1295271, БИ №9, 1987. 3. Mileshkin M.B. Diagnostics for strength of fibre-epoxy composite material wares using computer modeling of fracture processes / Mileshkin M.B., Biblik I.V. // Proceedings 2nd Int. Conf. «Computer Methods and Inverse Problems in Nondestructive Testing and Diagnostics». - Minsk, 1998. - P. 123–129. 4. Милешкин М.Б. Основные проблемы оценки остаточного ресурса элементов конструкций по состоянию разрушения материала / Милешкин М.Б., Библик И.В. // Удосконалювання турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання: Зб. наук. праць. – Харків: ІПМаш НАН України, 2003. – Т. 2. – С. 388–393.

УДК 534.1:539.3

ИМПУЛЬС ДАВЛЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЙ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ САМОЛЕТА С ПТИЦЕЙ

Онгирский Г.Г., канд. техн. наук, Шупиков А.Н., докт. техн. наук, проф.,

Угримов С.В., канд. техн. наук, Сметанкина Н.В., канд. техн. наук,

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

The determination of parameters of pressure impulse arising at collision of the plane with the bird is considered in paper. The complex of experimental and theoretical researches on identification of parameters of force influence on a barrier at impact by bird is carried out. The hydrodynamical model of the impulse describing this influence is developed.

Увеличение скорости и размеров самолетов, расширение сети маршрутов и интенсивности авиационных грузовых и пассажирских перевозок приводят к возрастанию количества столкновений летательных аппаратов с птицами. Такие столкнове-

ния представляют серьезную опасность для самолетов. Столкновения с птицей могут привести к повреждению самолета и даже к гибели экипажа и пассажиров. По данным ЮНЕСКО [1] с 1973 по 1978 годы из-за птиц произошло до 8 катастроф, а ежегодно регистрируется несколько тысяч столкновений птиц с гражданскими самолетами, расходы на ремонт которых исчисляются в миллионах долларов.

В связи с важностью этой проблемы, во всех документах, устанавливающих нормы летной годности самолета, предусмотрены особые требования по стойкости конструкций самолета при ударе птиц. Так, согласно нормам [1], принятым в Международной организации гражданской авиации (ИКАО), самолет должен безопасно завершить полет после столкновения в воздухе с птицей массой 1,81 кг.

Исследования в области птицестойкости элементов конструкций авиационной техники проводятся во всем мире [2-4]. К сожалению, в большинстве из этих работ эта проблема изучается не комплексно (отсутствует или экспериментальные данные или теоретические модели).

Предлагаемая работа посвящена определению параметров импульса давления, возникающего при ударе птиц по остеклению самолета. Проведенное исследование условно можно разбить на три этапа. На первом этапе с помощью натурального эксперимента определялась реакция конструкций на удар птиц, на втором – посредством решения обратной задачи определялась сила, действующая на эти конструкции при ударе, а на третьем – строилась математическая модель этого импульса.

В качестве метаемого объекта в натурном эксперименте использовались тушки кур массой от 1,620 кг до 1,910 кг, для их метания применялось пневматическое устройство. Удар наносился в центр стальной плиты размером 700x700x50, шарнирно закрепленной на опорной конструкции. Скорость метания составляла от 144 м/с до 160 м/с, угол соударения был выбран 90° .

В эксперименте измерялись деформации посередине тыльной стороны плиты при ударе. Для этого использовалась методика и аппаратура, разработанные в ИП-Маш НАН Украины. Измерение проводилось методом динамического широкополосного тензометрирования.

Для определения параметров силового воздействия, возникающего при ударе птиц, формулируется обратная задача по идентификации силового воздействия на плиту по известным ее деформациям. Поведение пластины описывается в рамках обобщенной теории пластин [5]. Для решения задачи применяется гибридный поисковый метод оптимизации [6]. Варьируемыми параметрами были значения силы $\{P_i\}$ и размеры области приложения нагрузки $\{R_i\}$, $i = \overline{1, N}$ для N последовательных моментов времени. Ограничения были представлены неравенствами $G_i = P_i \geq 0$, $G_i = R_i \geq 0$. В качестве функции цели $F(H)$ выбирается

$$F = F(H) = \sum_{k=1}^N \left\{ weight \cdot (\varepsilon_x^{(k)} - \tilde{\varepsilon}_x^{(k)})^2 + (1 - weight) \cdot (\varepsilon_y^{(k)} - \tilde{\varepsilon}_y^{(k)})^2 \right\},$$

где $weight$ – весовой коэффициент; $\varepsilon_x^{(k)}, \varepsilon_y^{(k)}$ – деформации, которые зависят от варьируемых значений силы P_i и размеров области контакта R_i , и определяются посредством решения прямой задачи; $\tilde{\varepsilon}_x^{(k)}, \tilde{\varepsilon}_y^{(k)}$ – экспериментально полученные значения деформаций.

Кроме того, была разработана гидродинамическая модель импульса давления, возникающего при ударе птицы о преграду. Тушка птицы моделируется эллипсоидом вращения с полуосями a и b . В соответствии с гидродинамической теорией предполагается, что сила контактного взаимодействия птицы и пластины определяется формулой

$$P_b(t) = \rho_b V^2 \pi u_b^2,$$

где ρ_b – плотность ткани птицы, V – скорость соударения, u_b – радиус площадки нагружения ($u_b = \frac{b}{a} \sqrt{2Vta - V^2t^2}$). Время действия нагрузки определяется по формуле $t_b = k \frac{2a}{V}$, где k – коэффициент выбирается на основе экспериментальных данных. Для прямого удара $k = 1,25$.

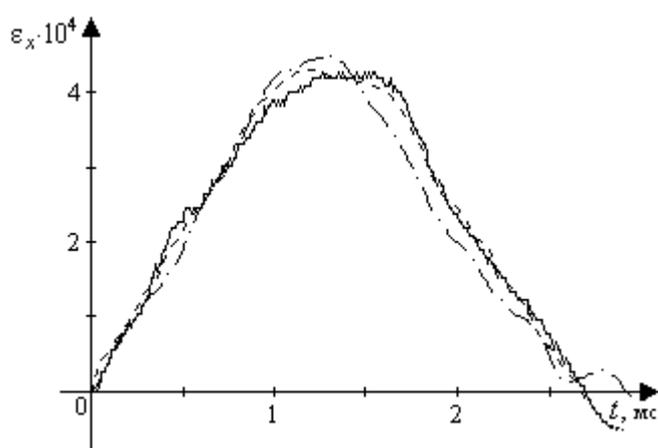


Рис. 1. Деформации.

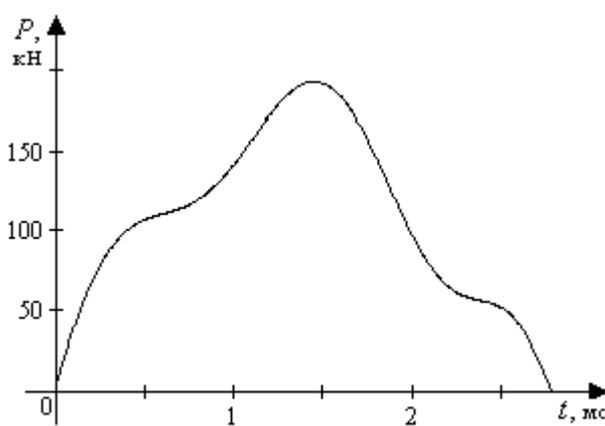


Рис. 2. Сила.

Результаты для одного из проведенных опытов приведены на рис.1-2. Удар наносится птицей массой 1,85 кг, скорость соударения 157 м/с. На рис. 1 представлены деформации посередине тыльной стороны плиты (сплошная линия – эксперимент, пунктир – деформации, рассчитанные по данным идентификации, штрихпунктир – расчет по гидродинамической модели). Результаты идентификации силы представлены на рис.2.

Видно, что расчетные деформации плиты практически совпадают с экспериментальными данными, что свидетельствует о достоверности результатов идентификации и работоспособности гидродинамической модели импульса.

Литература: 1. Фритш О. Безопасность полетов – задача № 1 // Курьер ЮНЕСКО.– 1978.– С.20 – 22. 2. Уилбек Дж.С. Разработка модели птицы для ударных испытаний авиационных двигателей / Дж. С. Уилбек, Дж. Л. Ренд // Энергетические машины.– 1981.– Т. 103, № 4.– С. 126 – 133. 3. Некоторые результаты обобщения физических, геометрических и весовых характеристик птиц, необходимых для оценки динамических процессов при соударении с преградой / В.Н. Голошапов, В.И. Лебединский, В.Э. Якоби, В.И. Янчина // Защита материалов и технических устройств от птиц. Сер. Биологические повреждения.– М.: Наука, 1984.– С. 201–214. 4. Budgey R. The development of a substitute artificial bird by the International Birdstrike Research Group for use in aircraft component testing // Conference of International Bird Strike Committee. – Amsterdam 17-21 April 2000.– P. 543-550. 5. Ugrimov S.V. Generalized theory of multilayer plates // Int. J. Solids Structures.– 2002. – Vol. 39, № 4. – P. 819 – 839. 6. 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.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ВИХРЕТОКОВЫХ ДЕФЕКТОСКОПОВ

Полищук О.Ф., канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)

In the report the effects(results) of signature analysis's of transformers of eddy-current defectoscope for pinch of responsively in flaws are given at simultaneous minimization of influence of the hindering factors. The optimum versions of balancing of transformers on rod ferrite are spotted.

Цель исследования - определение оптимальных характеристик преобразователей для повышения чувствительности к дефектам при одновременной минимизации

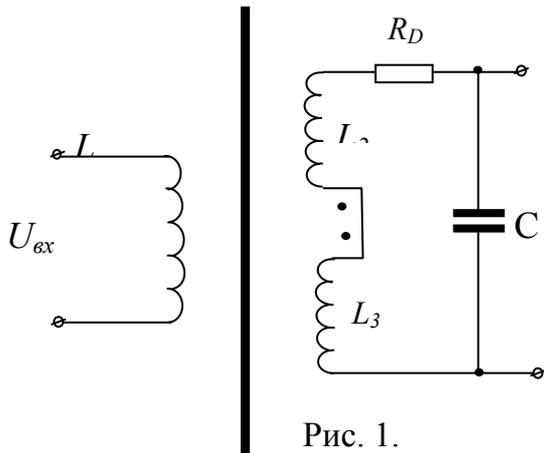


Рис. 1.

влияния мешающих факторов. Для повышения чувствительности преобразователя используется параллельное подключение конденсатора к концам измерительных катушек, включенных встречно. Электрическая схема такого соединения приведена на рис. 1.

В работе [1] получены выражения для э.д.с. измерительных обмоток в присутствии сред различной структуры. В рассматриваемом случае для аксиально расположенных катушек (рис. 1, рис. 2) результирующее напряжение определяется как

$$\dot{U}_{вн} = k_2 j \varphi_1(\lambda) \Big|_{\lambda=\frac{3}{2r}} - k_3 j \varphi_1(\lambda) \Big|_{\lambda=\frac{3}{2r}},$$

где $k_2 = \dot{U}_0 \cdot \ell^{-3} \frac{h_1+h_2}{2r}$; $k_3 = \dot{U}_0 \cdot \ell^{-3} \frac{h_1+h_3}{2r}$; $\dot{U}_0 = 23,8 \cdot 10^{-7} \cdot \omega(w_1 - w_2)rI$; I - ток возбуждающей обмотки; w_1 - число витков возбуждающей катушки; w_2 - число витков измерительной катушки; r - радиус обмотки; h - высота намотки; \dot{U}_0 - падение напряжения на обмотке; λ - обобщенный параметр преобразования Фурье-Бесселя; φ - функция, зависящая от параметров датчика и электрофизических свойств исследуемой среды; ω - круговая частота возбуждения. В переменном магнитном поле дефекты сплошности металла вызывает локальное изменение суммарного вектора напряженности магнитного поля, а значит к изменению полного сопротивления измерительной катушки z_k . По аналогии с теорией трансформаторов эти изменения характеризуются величиной вносимых сопротивлений [2]:

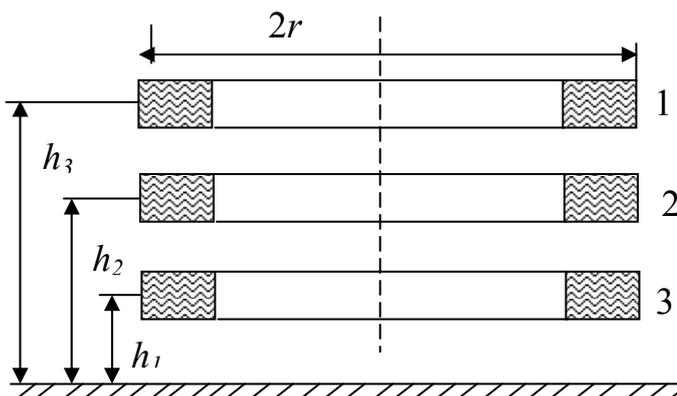


Рис. 2.

$R_{вн} = \frac{\omega^2 M^2}{R_9^2 + x_9^2} R_9$ и индуктивного

$\omega L_{вн} = \frac{\omega^2 M^2}{R_9^2 + x_9^2} x_9$, где $M = k_1 \sqrt{L_0 L_9}$ -

коэффициент взаимоиндуктивности;

$R_9 = R^2 + R_n$; $x_9 = x_2 + x_n$; $L_9 = x_9 / \omega$;

R_2, x_2 - сопротивление эквивалентной вторичной цепи; R_n, x_n - активное и реактивное сопротивления нагрузки.

Изменение $z_{ик}$ при наличии дефекта в изделии преобразуется в изменение амплитуды напряжения периодического сигнала. Полное сопротивление контура:

$$z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R_D}{z_D^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega L_D}{z_D^2} - \omega C\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R_D}{R_D^2 + \omega^2 L_D^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega L_D}{R_D^2 + \omega^2 L_D^2} - \omega C\right)^2}}$$

Для получения наибольшей чувствительности необходим подбор параметров контура (емкости C), чтобы работа происходила в области резонанса. В этом случае

$$z = \frac{R_D + \omega_0^2 L_D^2}{R_D}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_D C} - \frac{R_D^2}{L_D^2}}, \quad Q = \frac{\omega_0 L_D}{R_D},$$

где ω_0 - резонансная частота; Q - добротность контура.

Рабочая точка выбирается на середине склона резонансной кривой. При определенной настройке контура преобразователя устраняется так называемый "краевой эффект", являющийся недостатком аналогичных приборов.

Таким образом, при движении датчика, содержащего в себе возбуждающую и измерительные катушки, по исследуемому металлическому изделию нарушения сплошности (трещины) вызывают увеличение результирующего магнитного поля, а следовательно, и приращения z , то есть увеличение выходного напряжения резонансного контура. По увеличению амплитуды сигнала можно определить наличие дефекта.

Возможны различные варианты настройки преобразователей. Одним из них является балансировка, которая может быть при $\Delta = 0$ и $\Delta = \infty$, где Δ - расстояние между преобразователем и контролируемой поверхностью.

Для преобразователя стержневого типа h_1 (рис. 2) из конструктивных соображений выбрано равным 5 мм. Ферритовый стержень имеет толщину 4 мм, диаметры катушек $2r=10$ мм, число витков $w_1=w_2=w_3=200$, высота катушек - 6 мм. Катушки имеют возможность перемещаться по ферритовому сердечнику. Так как $h_{1min}=5$ мм, измерительная катушка фиксировалась, а катушки возбуждения и компенсационная - перемещались.

Рассмотрим рекомендуемый в литературе режим контроля при балансе напряжений измерительной и компенсационной катушек при $\Delta=\infty$. Минимальное значение напряжения $U_{вых min}=0,032$ В. Преобразователь перемещался по контролируемой поверхности в направлении трещины с расстояния $l=10$ мм. На рис. 3 приведены

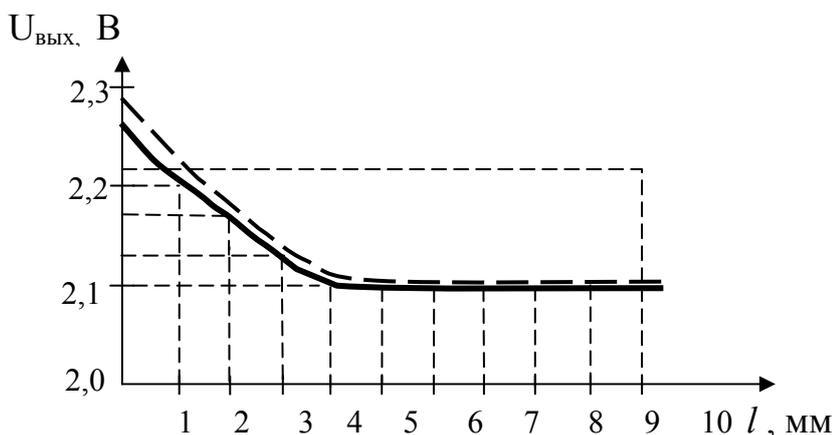


Рис. 3.

графики зависимости реакций преобразователя на трещину и на край поверхности (пунктирная линия). Из полученных результатов следует, что режим контроля при условии баланса при $\Delta=\infty$ не соответствует требованиям к преобразователю по чувствительности и имеет сильный краевой эффект (реакция на край больше реакции

на трещину). Рассмотрим второй вариант - компенсация при установке на металл. На рис. 4 приведены графики реакции преобразователя на расстояние до трещины и до края контролируемой поверхности для режима баланса при $\Delta=0$. Из графика следует, что реакция на трещину составляет 20 %, реакция на край составляет 10 %, так что в принципе такой режим баланса может быть использован для контроля трещин, но разность между реакцией на трещину и на край составляет 90 мВ.

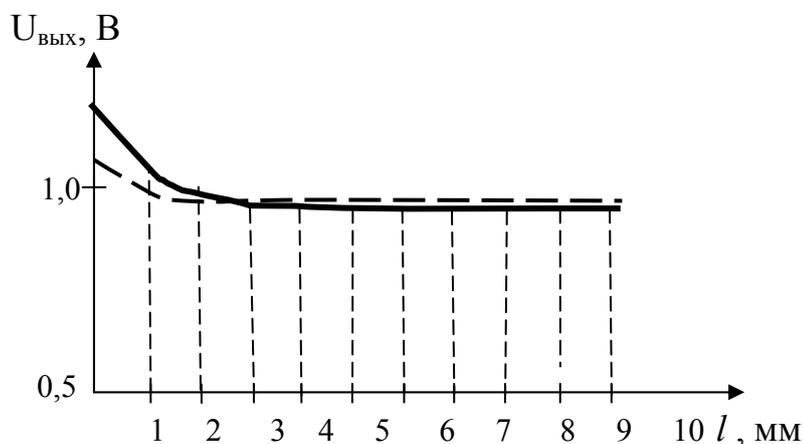


Рис. 4.

Рассмотрим варианты расстройки баланса измерительной и компенсационной катушек путем изменения h_2 и h_3 относительно положения баланса при $h_{20}=19$ мм, $h_{30}=28$ мм. Любое изменение значений h_2 и h_3 относительно h_{20} и h_{30} приводит к увеличению амплитуды выходного суммарного напряжения измерительной и компенсационной катушек. Рассмотрим вариант при увеличении h_2 . При этом h_1 и h_3 остаются неизменными.

Результаты эксперимента для расстройки при $h_2=17$ мм приведены на графике (рис. 5). Полученные результаты являются наилучшими. Реакция на трещину составляет 600 мВ, а разница между реакциями на трещину и на край контролируемой поверхности составляет 350 мВ.

Кроме взаимного расположения катушек важным параметром является резонансная частота контура, образованного измерительной и компенсационной катушками и включенным параллельно им конденсатором. Резонансный режим повышает чувствительность электромагнитного метода. Резонансная частота контура зависит от вносимого сопротивления при приближении преобразователя к металлу. Очевид-

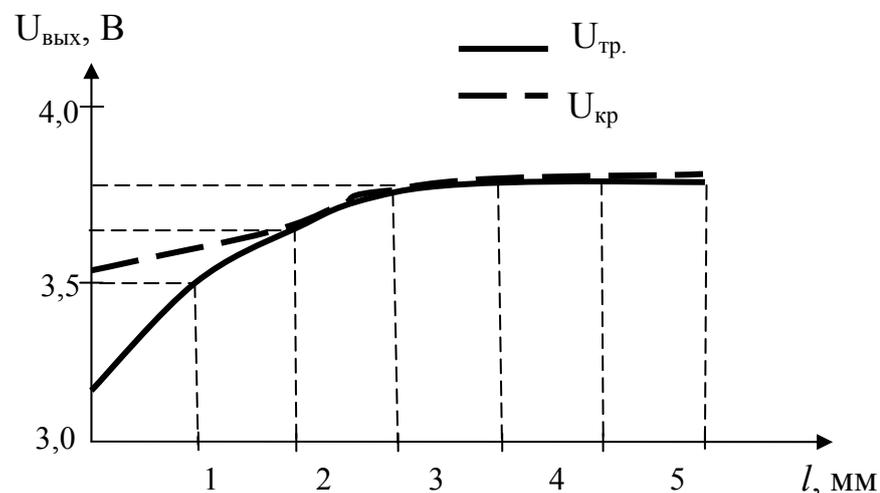


Рис. 5.

на также зависимость резонансной частоты контура от свойства металла и степени его намагниченности. Поэтому параметры контура и частота возбуждения подбираются для определенного класса контролируемых объектов. Исследования показали, что выбор рабочей точки на резонансной кривой ниже резонансной частоты

снижает чувствительность преобразователя, а выбор рабочей точки на частоте, которая больше резонансной повышает чувствительность к трещине с одновременным увеличением краевого эффекта. Оптимальным вариантом является выбор рабочей частоты преобразователя больше значения резонансной частоты так, чтобы выходное напряжение преобразователя было на 10 – 15 % меньше максимальной амплитуды.

На практике не удается изготовить преобразователи с абсолютно идентичными параметрами, поэтому каждый преобразователь требует индивидуальной настройки, для чего могут быть использованы полученные результаты.

Литература: 1. Соболев В. С. Накладные и экранные датчики / В. С. Соболев, Ю. М. Шкарлет. – Новосибирск.: Наука, 1967. -144 с. 2. Дорофеев А.Л. Электромагнитная дефектоскопия / А.Л. Дорофеев, Ю.Г. Казаманов. – М.:Машиностроение, 1980. - 232 с.

УДК 534.232.001. 11:62.50

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПЛОЩАДИ МАГНИТОПРОВОДА НА ПОЛЮСАХ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЕ

Божко А.Е., член-корреспондент НАН Украины, **Белых В.И.**, канд. тех. наук, **Мягкохлеб К.Б.** (г.Харьков, Украина)

In the report the simple method of definition(determination) of the area of cross section of magnetic circuit EMV at poles in function of parameters and physical sizes i , U , w is offered. These formulas facilitate account and give a clear picture in a choice of section of magnetic circuit EMV.

Электромагнитные вибровозбудители (ЭМВ) широко используются в качестве двигателей транспортеров в различные отрасли промышленности, технологических процессах перемешивания сыпучих сред, виброиспытательных стендах и т.д. [1, 2]. На современном этапе развития теории электромагнитного возбуждения вибраций и ударов глубоко разработанные методы расчетов тяговых усилий для одно- и двухтактных схем вибронагружения, а также вопрос выбора упругих элементов, которые нашли широкое применение при проектировании строительных машин и при транспортировании сыпучих материалов. Постоянное возрастание роли вибрационных испытаний, а также расширение области технологического применения электромаг-

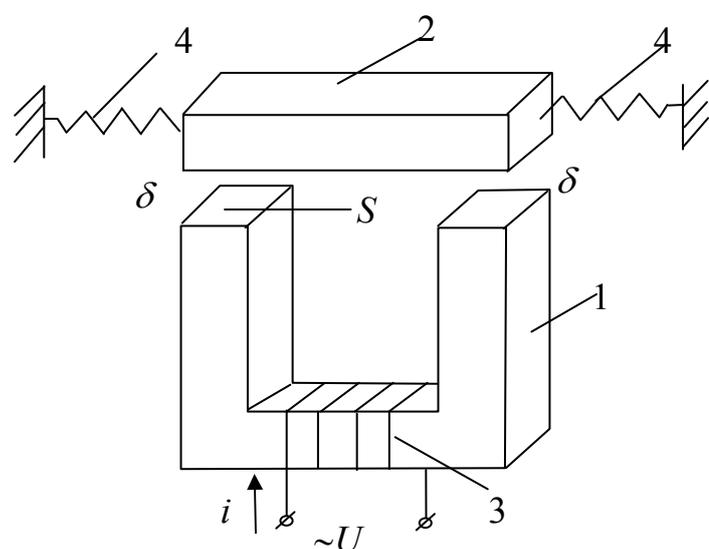


Рис. 1.

нитных возбудителей вибраций и ударов требует особого внимания к этой проблеме.

Электромеханическая схема ЭМВ представлена на рис. 1, где: 1 – магнитопровод (жестко соединен с корпусом); 2 – якорь (подвижная часть); 3 – обмотка с электрическим током i ; 4 – пружины; $\sim U$ – переменное электрическое напряжение; δ – воздушный зазор; S – площадь поперечного сечения магнитопровода 1 у полюсов.

Подвижная часть 2 представляет собой колебательную систему (КС) с одной степенью свободы. Уравнение

движения КС следующее

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + cx = F, \quad (1)$$

где m – масса якоря с механической нагрузкой на нем; b , c – коэффициенты демпфирования и жесткости соответственно; F – тяговое усилие.

Тяговое усилие F определяется следующим образом. Записываем выражение электромагнитной энергии ЭМВ в виде [3]

$$W_e = \frac{1}{2} Li^2, \quad (2)$$

где L – индуктивность обмотки 3.

Известно [3], что $L = w^2 G$, $G = \frac{\mu_0 S}{2\delta}$, где μ_0 – магнитная проницаемость воздуха; S – площадь поперечного сечения магнитопровода 1.

Тогда с учетом этих выражение (2) запишется так

$$W_e = \frac{1}{4\delta} w^2 \mu_0 Si^2. \quad (3)$$

Тяговое усилие F определяется по формуле

$$F = \frac{dW_e}{d(2\delta)} = \frac{1}{2} \mu_0 S \left(\frac{iw}{2\delta} \right)^2. \quad (4)$$

Как видно из выражения (4), тяговое усилие пропорционально площади поперечного сечения S . Установившееся значение перемещения

$$x = x_a \cos(2\omega t - \varphi_x), \quad (5)$$

где x_a – амплитуда; ω – круговая частота гармонического напряжения $U = U_a \sin \omega t$ ($\omega = 2\pi f$, f – частота); t – время; φ_x – угол сдвига между x и F , причем [4]

$$\left. \begin{aligned} x_a &= \frac{F_a}{m \sqrt{(\omega_0^2 - 4\omega^2)^2 + \left(\frac{2b}{m} \omega\right)^2}} \\ \varphi_x &= \arctg \frac{2b\omega}{m(\omega_0^2 - 4\omega^2)} \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где ω_0 – собственная частота КС, $\left(\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}\right)$; F_a – амплитуда тягового усилия.

Выразим функциональную зависимость S от параметров и физических величин ЭМВ. Для этого подставим (4) в первое выражение из (6). Тогда получим

$$\frac{1}{2} \mu_0 S \left(\frac{iw}{2\delta} \right)^2 = x_a m \left[(\omega_0^2 - 4\omega^2)^2 + \left(\frac{2b}{m} \omega \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}},$$

откуда

$$S = \frac{2x_a m}{\mu_0} \left(\frac{2\delta}{iw} \right)^2 \left[(\omega_0^2 - 4\omega^2)^2 + \left(\frac{2b}{m} \omega \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

Выразим S относительно амплитуды входного задающего напряжения $\sim U$. Для

этого запишем амплитуду тока i_a в виде

$$i_a = \frac{U_a}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}},$$

где r – активное сопротивление провода обмотки 3.

Обычно $r \ll \omega L$. Поэтому

$$i_a = \frac{U_a}{\omega L} = \frac{U_a}{\omega w^2 G} = \frac{2U_a \delta}{\mu_0 S \omega w^2}. \quad (8)$$

Подставим (8) в (7). В результате имеем

$$S = \frac{1}{2\mu_0 m x_a} \left(\frac{U_a}{\omega w} \right)^2 \left[(\omega_0^2 - 4\omega^2)^2 + \left(\frac{2b}{m} \omega \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

Выражения (8) и (9) определяют площадь поперечного сечения магнитопровода ЭМВ у полюсов в функции параметров и физических величин i , U , ω . Эти формулы облегчают расчет и дают ясную картину в выборе сечения магнитопровода ЭМВ.

Это актуально при создании методов электромагнитного возбуждения гармонических, полигармонических и пространственных вибраций, а также при исследовании влияния сложных форм колебаний на процесс кристаллизации металла, применение вибрации для технологического процесса литья, которое дает возможность: улучшить структуру металла; ускорить процесс диффузии атомов водорода; ускорить процесс вытеснения неметаллических примесей; достичь равномерного распределения легирующих добавок и имеет важное значение для повышения эффективности данного технологического процесса [5].

Литература: 1. Вибрации в технике / Под ред. д.т.н., проф. Э.Э. Лавендела.– М.: Машиностроение, 1981.–Т. 4.–510 с. 2. Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы.–М.: Энергоатомиздат, 1989.–160 с. 3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники.– М.: Высш. шк. 1985.–528 с. 4. Божко А.Е., Голуб Н.М. Динамико-энергетические связи колебательных систем.–Киев: Наук. думка, 1980.–188 с. 5. Специальные способы литья. Справочник. М: Металлургия.–2002.–568с.

УДК 539.3

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ

Тарсис Ю.Л., канд. техн. наук, **Тарсис Е.Ю.**, канд. техн. наук
(г. Харьков, Украина)

The problem of construction of adequate dynamic model of a crankshaft, as spatial beam system is esteemed. At quasistatic calculations the elastic characteristics of the arbor are determined by a finite element method in three-dimensional statement for a separate elbow at the conforming boundary conditions. The identification of parameters of discrete beam model of the arbor is offered to be executed on the basis of influence coefficients obtained by a finite element method.

Рассматривается задача построения адекватной динамической модели коленчатого вала, как пространственной стержневой системы. При квазистатических расчетах упругие характеристики вала определяются методом конечных элементов в трехмерной постановке для отдельного колена при соответствующих граничных

условиях. Идентификацию параметров дискретной стержневой модели вала предлагается осуществлять на основе коэффициентов влияния, полученных методом конечных элементов.

Постановка задачи. При решении многих задач динамики и прочности сложных механических систем используются дискретные модели их элементов. Адекватность таких моделей в значительной мере зависит от заданных параметров, характеризующих переход от континуальной модели к дискретной. Далеко не всегда эти параметры можно определить по чертежам без исследования связи между нагрузками и напряженно-деформированным состоянием реальной модели. Общего решения проблемы в настоящее время не существует. В данной работе предлагается метод идентификации параметров жесткости стержневой динамической модели коленчатого вала на основе сопоставления результатов динамических расчетов с результатами квазистатических расчетов, в которых эти параметры определяются методом конечных элементов.

Квазистатические расчеты многоопорных коленчатых валов с учетом различных конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов осуществляются методом надпорных моментов в матричной форме [1]. Поскольку колено вала является пространственным объектом сложной формы (значительный коэффициент перекрытия шатунной и коренных шеек, соизмеримость длин коренных и шатунных шеек с размерами их поперечных сечений, внутренние полости и др.) для определения упругих характеристик используется метод конечных элементов в трехмерной постановке [2]. Углы поворота надпорных сечений колен вала определяются на основе нагружения модели отдельного колена единичными силами, соответствующими нагрузкам на колено, передаваемым шатуном, силам инерции неуравновешенных масс шатунно-поршневой группы, щек и противовесов, и надпорными моментами. При этом реализуются соответствующие граничные условия.

Для решения задачи о связанных установившихся изгибно-продольно-крутильных колебаниях коленчатого вала применяется метод динамических жесткостей [3]. Коленчатый вал моделируется совокупностью пространственно ориентированных стержней постоянного поперечного сечения. Матрицы динамических жесткостей стержней содержат параметры их жесткости (площади и моменты инерции), отражающие связь между силами и перемещениями узлов стержней, имеющих по шесть степеней свободы. Естественно, от точности задания этих параметров зависит адекватность динамической модели вала и достоверность результатов расчетов. Поэтому в данной работе ставится задача построения алгоритма идентификации указанных параметров стержневой модели колена на основе имеющихся данных об упругих характеристиках, полученных на основе метода конечных элементов.

Метод идентификации параметров и его реализация. При постановке задачи идентификации принималось, что нагрузки в динамических и квазистатических расчетах приложены в одних и тех же точках моделей. Упругими характеристиками вала при квазистатическом расчете являются углы поворота надпорных сечений вала, разбитого на однопролетные участки в средних сечениях коренных шеек с помощью шарниров Гука. Расчетная схема колена коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания с двумя шатунами, расположенными рядом на одной шатунной шейке, приведена на рис. 1.

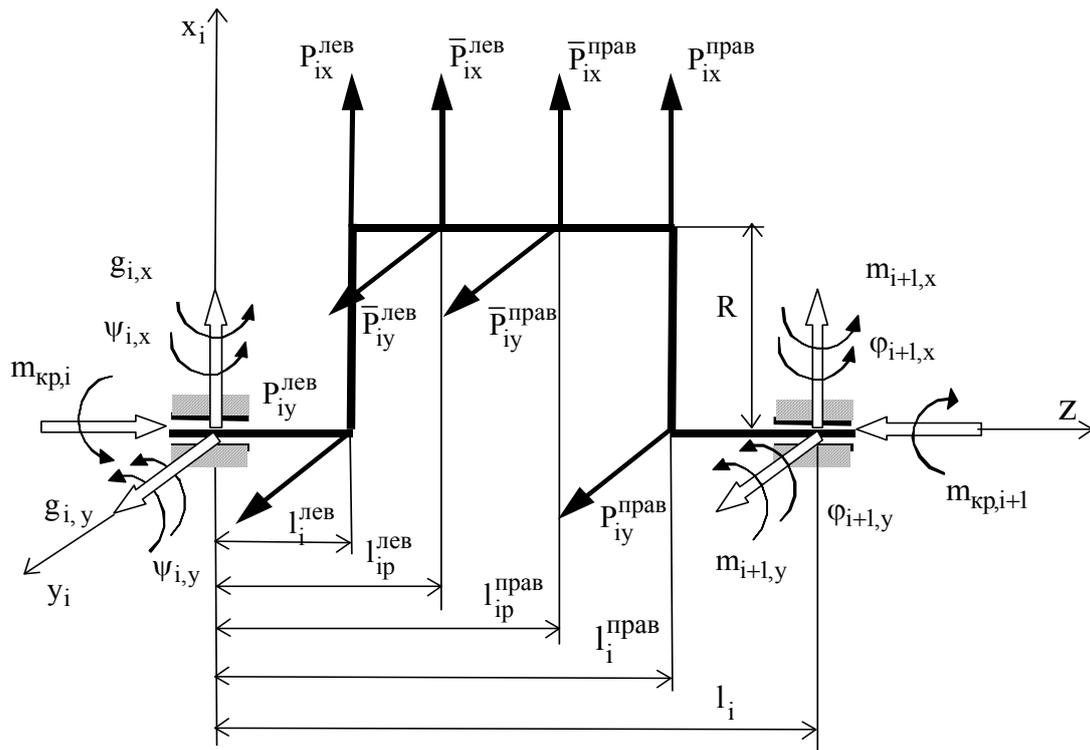


Рис.1. Расчетная схема i – го колена.

Этот случай наиболее общий. Если на шатунной шейке расположен один шатун, то участков на ней будет два, вместо трех. Соответственно уменьшится число коэффициентов влияния – углов поворота надпорных сечений.

Таблица 1

Коэффициенты влияния от единичных сил

Углы поворота надпорных сечений	$\bar{P}_{ix}^{лев}$	$\bar{P}_{iy}^{лев}$	$\bar{P}_{ix}^{прав}$	$\bar{P}_{iy}^{прав}$	$P_{ix}^{лев}$	$P_{iy}^{лев}$	$P_{ix}^{прав}$	$P_{iy}^{прав}$
$\varphi_{i+1,x}$	–	$\bar{s}_{ix}^{лев}$	–	$\bar{s}_{ix}^{прав}$	–	$s_{ix}^{лев}$	–	$s_{ix}^{прав}$
$\varphi_{i+1,y}$	$\bar{s}_{iy}^{лев}$	–	$\bar{s}_{iy}^{прав}$	–	$s_{iy}^{лев}$	–	$s_{iy}^{прав}$	–
$\psi_{i,x}$	–	$\bar{t}_{ix}^{лев}$	–	$\bar{t}_{ix}^{прав}$	–	$t_{ix}^{лев}$	–	$t_{ix}^{прав}$
$\psi_{i,y}$	$\bar{t}_{iy}^{лев}$	–	$\bar{t}_{iy}^{прав}$	–	$t_{iy}^{лев}$	–	$t_{iy}^{прав}$	–

Таблица 2

Коэффициенты влияния от единичных моментов

Углы поворота надпорных сечений	$m_{i+1,x}$	$m_{i+1,y}$	$g_{i,x}$	$g_{i,y}$	$m_{кр,i}$
$\varphi_{i+1,x}$	$c_{i,x}$	–	$b_{i,x}$	–	w_i
$\varphi_{i+1,y}$	–	$c_{i,y}$	–	$b_{i,y}$	–
$\psi_{i,x}$	$b_{i,x}$	–	$d_{i,x}$	–	w_i
$\psi_{i,y}$	–	$b_{i,y}$	–	$d_{i,y}$	–

Коэффициенты влияния от действия единичных внешних нагрузок приведены в таблице 1, а от единичных моментов – в таблице 2. Как уже отмечалось, они, определяются методом конечных элементов. В то же время, для стержневой модели, эти же коэффициенты могут быть определены методами сопротивления материалов, например способом Верещагина, и представлены линейными функциями параметров жесткости стержней (площадей и моментов инерции поперечных сечений).

Коэффициенты влияния, полученные методами сопротивления материалов на основе стержневой модели колена, в обобщенном виде могут быть записаны с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned} \varphi_{i+1,y}(P_x) &= \sum_{k=1}^n \left[\frac{M_{k,y}(P_x) \cdot M_{k,y}(m_{i+1,y}) \cdot l_k}{EJ_{ky}} + \frac{N_k(P_x) \cdot N_k(m_{i+1,y}) \cdot l_k}{EF_k} \right]; \\ \varphi_{i+1,x}(P_y) &= \sum_{k=1}^n \left[\frac{M_{k,x}(P_y) \cdot M_{k,x}(m_{i+1,x}) \cdot l_k}{EJ_{kx}} + \frac{M_{kp,k}(P_y) \cdot N_k(m_{i+1,x}) \cdot l_k}{GJ_{p,k}} \right]; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \psi_{i,y}(P_x) &= \sum_{k=1}^n \left[\frac{M_{k,y}(P_x) \cdot M_{k,y}(g_{1,y}) \cdot l_k}{EJ_{ky}} + \frac{N_k(P_x) \cdot N_k(g_{i,y}) \cdot l_k}{EF_k} \right]; \\ \psi_{i,x}(P_y) &= \sum_{k=1}^n \left[\frac{M_{k,x}(P_y) \cdot M_{k,x}(g_{i,x}) \cdot l_k}{EJ_{kx}} + \frac{M_{kp,k}(P_y) \cdot N_k(g_{i,x}) \cdot l_k}{GJ_{p,k}} \right], \end{aligned}$$

где приняты обозначения: $M_{k,y}, M_{k,x}, N_k, M_{kp,k}$ – общее обозначение эпюр изгибающих моментов, продольных сил и крутящих моментов на k -м участке модели; P_x, P_y – общее обозначение единичных нагрузок, действующих в соответствующих плоскостях; $l_k, F_k, J_{kx}, J_{ky}, J_{p,k}$ – длины, площади, осевые и полярные моменты инерции стержней на соответствующих участках; E, G – модули упругости материала 1-го и 2-го рода.

При построении алгоритма решения учтено следующее:

- 1) нагрузки, действующие в плоскости колена, не вызывают поворотов надпорных сечений в плоскости, перпендикулярной плоскости колена, и наоборот – нагрузки, действующие в плоскости, перпендикулярной плоскости колена, не вызывают поворотов этих сечений в плоскости колена;
- 2) в связи с симметрией колена справедливы равенства
$$c_{i,x} = d_{i,x}, c_{i,y} = d_{i,y}, \bar{s}_{iy}^{лев} = -\bar{t}_{iy}^{прав}, \bar{s}_{iy}^{прав} = -\bar{t}_{iy}^{лев}, s_{iy}^{лев} = -t_{iy}^{прав}, s_{iy}^{прав} = -t_{iy}^{лев};$$
- 3) в выражения (1) не входят площадь и полярный момент инерции коренной шейки и площадь шатунной шейки. Они, как и длины участков, задаются на основе чертежей.

Задача идентификации может быть сформулирована следующим образом. Известные коэффициенты влияния образуют вектор

$$S = \left\{ \bar{s}_{iy}^{лев}, \bar{s}_{iy}^{прав}, s_{iy}^{лев}, s_{iy}^{прав}, c_{i,y}, b_{i,y}, \bar{s}_{ix}^{лев}, \bar{s}_{ix}^{прав}, s_{ix}^{лев}, s_{ix}^{прав}, \bar{t}_{ix}^{лев}, \bar{t}_{ix}^{прав}, t_{ix}^{лев}, t_{ix}^{прав}, c_{i,x}, b_{i,x}, w_i \right\},$$

а искомые параметры стержней – вектор

$$X = \left\{ \frac{1}{J_{ky}}, \frac{1}{J_{уу}}, \frac{1}{F_{уу}}, \frac{1}{J_{уу}}, \frac{1}{J_{kx}}, \frac{1}{J_{ux}}, \frac{1}{J_{up}}, \frac{1}{J_{ux}}, \frac{1}{J_{up}} \right\},$$

где индексы k, \underline{u}, m означают, соответственно, коренную шейку, щеку и шатунную шейку. Вектор X может быть определен из матричного уравнения:

$$A \cdot X = S, \quad (2)$$

где A – прямоугольная матрица, образованная на основе зависимостей (1) и имеющая блочный вид:

$$A = \begin{pmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{pmatrix}.$$

Здесь A_1 – матрица размером 6×4 , A_2 – матрица размером 11×5 . Следует отметить, что для вала с одним шатуном число коэффициентов влияния и размерности указанных матриц будут другими.

Для приближенного решения системы линейных алгебраических уравнений с прямоугольной матрицей используется метод наименьших квадратов, с помощью которого минимизируется вектор невязки системы (2). Запишем квадратичный функционал невязок

$$L = (a_{11}\bar{x}_1 + a_{12}\bar{x}_2 + \dots + a_{1m}\bar{x}_m - s_1)^2 + (a_{21}\bar{x}_1 + a_{22}\bar{x}_2 + \dots + a_{2m}\bar{x}_m - s_2)^2 + \dots + (a_{n1}\bar{x}_1 + a_{n2}\bar{x}_2 + \dots + a_{nm}\bar{x}_m - s_m)^2,$$

где n – число строк, m – число столбцов матрицы A ; \bar{x}_i – компоненты вектора \bar{X} , удовлетворяющие условию минимума функционала L

$$\frac{\partial L}{\partial \bar{x}_i} = 0, \quad i = 1, \dots, m. \quad (3)$$

Минимизация функционала L приводит к решению матричного уравнения

$$A^T A \bar{X} = A^T S, \quad (4)$$

где $A^T A$ – квадратная матрица порядка m , индекс T над матрицей означает транспонирование.

Решение системы (4) имеет вид:

$$\bar{X} = (A^T A)^{-1} A^T S. \quad (5)$$

На основании полученного решения формируется комплект параметров дискретной стержневой модели коленчатого вала. Следует отметить, что полученные в результате идентификации параметры (площади и моменты инерции) совершенно не согласуются с аналогичными параметрами, определенными по чертежам, особенно для щек. Это подтверждает тот факт, что колено вала находится в существенно трехмерном напряженно-деформированном состоянии и замена его стержневой моделью невозможна без проведения подобной идентификации. Предложенный метод реализован в виде программного модуля и включен в пакет прикладных программ по расчету связанных вынужденных колебаний коленчатого вала на ПЭВМ.

Апробация метода и выводы. Решение (5) приводит к минимизации вектора невязки методом наименьших квадратов. Однако, во-первых, это не гарантирует близость всех коэффициентов влияния, полученных подстановкой вектора \bar{X} в уравнения (2). Как показывают расчеты, различия в отдельных случаях могут быть довольно значительными. Во-вторых, полученные решения зависят от задания некоторых параметров модели априори на основе чертежей, или из других соображений. Возникает естественный вопрос об адекватности построенной дискретной модели. Оценка адекватности модели должна, очевидно, основываться на некоторых объек-

тивных критериях. Такими критериями можно считать близость основных результатов расчетных исследований в квазистатической постановке, где коэффициенты влияния определены методом конечных элементов, и в динамической постановке с идентифицированными параметрами стержней. В программе расчета вынужденных колебаний предусмотрено задание частоты, равной нулю для всех гармоник разложения внешней нагрузки в ряд Фурье, что делает динамический расчет полностью адекватным статическому. При сопоставлении результатов подобным образом, исследуется адекватность моделей в более широком смысле, нежели только в части идентификации параметров стержней.

Такие исследования были проведены для коленчатого вала четырехтактного 8-ми цилиндрового V-образного дизеля промышленного трактора. Поскольку в квазистатической модели опоры имеют различную податливость в двух направлениях, а в динамической предполагаются изотропно-упругими, то их податливости в последней были усреднены. В разложении внешней нагрузки учтены 24 гармоники возбуждения. При сопоставлении большого числа параметров, среди которых основными были запасы усталостной прочности в наиболее опасных сечениях колен вала, различия в результатах расчетов не превысили 12 %. Учитывая тот факт, что погрешности связаны не только с погрешностями идентификации, но и с усреднением податливости опор и принятым числом членов разложения внешней нагрузки, можно сделать вывод о достаточно высокой степени адекватности динамической стержневой модели коленчатого вала. Проведенные расчеты связанных вынужденных колебаний данного коленчатого вала и сравнение их результатов с результатами аналогичных квазистатических расчетов показали, что максимальные различия в запасах усталостной прочности достигают 33–40 % в средней части вала. Таким образом, наличие сопоставимых континуальной (в определенном смысле) и дискретной моделей исследуемого объекта позволяет осуществить идентификацию параметров дискретной модели и добиться достаточно высокой степени ее адекватности.

Литература: 1. Захаров С.М., Тарсис Ю.Л., Шорох Е.А. Совместный расчет многоопорного коленчатого вала и подшипников скольжения. Вестник машиностроения, 1985, №1. – С. 5-7. 2. Тарсис Ю.Л., Шорох Е.А. Определение упругих характеристик коленчатого вала ДВС методом конечных элементов. Рукопись депонирована в УкрНИИНТИ, 1984, № 825 Ук–84 Деп. – 17 с. 3. Тарсис Ю.Л. Расчет вынужденных связанных колебаний коленчатого вала с кинематическим возбуждением в опорах. Физические компьютерные технологии в народном хозяйстве. Труды 5-й Международной научно-технической конференции. г. Харьков, 2002.– С. 645-648.

УДК 539.3

МЕТОД БУБНОВА-ГАЛЕРКИНА ДЛЯ АНАЛИЗА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КОНСТРУКЦИЯХ

Морачковский О.К., докт. техн. наук, **Дружинин Е.И.**, канд. техн. наук,
Ромашов Ю.В., канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)

This paper deals with classical Galerkin method with global trial functions as universal method of the analyses of the physical and mechanical processes taking place in engineering constructions. The examples of the thermoelasticity problems solving for cylinders are shown.

Постановка проблемы. Прогнозирование поведения элементов машиностроительных конструкций в процессе эксплуатации требует учета всей гаммы протекающих в них физико-механических процессов. Совместное рассмотрение нескольких

физических процессов обычно сводится к рассмотрению последовательности краевых задач. В этом случае вычислительные затраты, требуемые для осуществления одного шага итерации, могут оказаться принципиальными, поскольку относительно небольшое снижение точности на шаге итерации для уменьшения вычислительных затрат может привести к большим погрешностям при реализации итерационного процесса в целом. Разработка высокоточных универсальных численных методов решения задач анализа физико-механических процессов в элементах машиностроительных конструкций относится к важным научно-практическим проблемам. С этой целью в работе рассмотрена общая схема метода Бубнова-Галеркина для решения задач анализа физико-механических процессов в элементах конструкций и рассмотрены примеры ее использования с целью оценки целесообразности последующего применения указанной схемы при решении задач ползучести для прогнозирования длительной прочности энергетического и реакторного оборудования.

Анализ исследований и публикаций. Для решения задач анализа однородных физических процессов в элементах конструкций весьма эффективными являются вариационные методы, использующие локальные аппроксимации, в частности метод конечных элементов. Использование локальных аппроксимаций позволяет формализовать решение задачи, однако порождает необходимость выполнения огромного числа вычислений, что связано с необходимостью обеспечения требуемого уровня точности получаемых решений, а применение вариационного подхода ограничивается задачами, допускающими вариационную формулировку. Традиционные методы Бубнова-Галеркина, использующие глобальные аппроксимации, дают возможность достижения высокой точности при относительно малом объеме вычислений, не требуют вариационной формулировки. Основным препятствием к распространению таких методов являлись трудности построения аналитических аппроксимаций, точно удовлетворяющих граничным условиям задачи [1], однако развитие методов теории R-функций [2] на сегодняшний день полностью снимает это ограничение. Эти обстоятельства позволяют предположить, что традиционный метод Бубнова-Галеркина с глобальными аппроксимациями является весьма перспективным для решения краевых задач при анализе физико-механических процессов в элементах машиностроительных конструкций.

Цель и постановка задачи. Целью данного исследования является изучение особенностей реализации метода Бубнова-Галеркина при решении одномерных краевых задач теории упругости и теплопроводности для оценки возможности и целесообразности его последующего применения при решении двумерных краевых задач при прогнозировании длительной прочности и ресурса энергетического и реакторного оборудования.

Рассмотрим общую схему метода Бубнова-Галеркина применительно к наиболее общей постановке квазистатической задачи об определении физико-механических процессов в элементах машиностроительных конструкций. Задача формулируется следующим образом: необходимо определить вектор $v = v(x)$, составленный из n величин, где под обозначением x понимается совокупность пространственных координат. Искомый вектор должен удовлетворять условиям в точках заданной области Ω и на ее границе $\partial\Omega$:

$$Lv = f_{\Omega}, \forall x \in \Omega, \quad (1)$$

$$Bv = f_{\partial\Omega}, \forall x \in \partial\Omega, \quad (2)$$

где L, B - некоторые операторы, записанные в виде матриц размером $n \times n$, $f_\Omega = f_\Omega(x)$, $f_{\partial\Omega} = f_{\partial\Omega}(x)$ - заданные векторы, включающие по n компонент.

В соответствие с методом Бубнова-Галеркина представим искомое решение $v = v(x)$ аппроксимацией:

$$v_N = v_0 + \sum_{i=1}^N a_i \varphi_i, \quad (3)$$

где $v_0 = v_0(x)$, $\varphi_i = \varphi_i(x)$, $i = \overline{1, N}$ - заданные векторы, подобранные так, чтобы условия (2) выполнялись при любых значениях коэффициентов аппроксимации a_i , $i = \overline{1, N}$, подлежащих определению.

Вид векторов $v_0 = v_0(x)$, $\varphi_i = \varphi_i(x)$, $i = \overline{1, N}$, имеющих по n компонент, определяется видом оператора B , вектора $f_{\partial\Omega}$ и формой границы $\partial\Omega$; совокупность векторов $\varphi_i(x)$, $i = \overline{1, N}$, называемых пробными функциями, должна обладать условиями полноты и линейной независимости. Построение указанных векторов можно осуществить при помощи методов теории R-функций для областей произвольной формы [2]. В частности такие аппроксимации могут быть построены для приближенных решений пространственных задач теории упругости при независимой аппроксимации напряжений и перемещений [3]. Далее будем использовать запись аппроксимаций (3) в матрично-векторной форме:

$$v_N = v_0 + \Phi a, \quad (4)$$

где $a^T = (a_1, a_2, \dots, a_N)$, $\Phi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N)$ - матрица размерности $n \times N$.

Для определения коэффициентов аппроксимации из (3), следуя методу Бубнова-Галеркина, запишем условия ортогональности невязки уравнения (1) к пробным функциям. Предполагая что оператор L является линейным и используя свойство ассоциативности произведения матриц, получим:

$$\left(\int_{\Omega} (\Phi^T L \Phi) d\Omega \right) a = \int_{\Omega} \Phi^T (f_\Omega - L v_0) d\Omega, \quad (5)$$

Численное вычисление произведений $L\Phi$ и Lv_0 , которые определяют действие дифференциального оператора L на некоторые функции, осуществим так:

$$L\Phi = \sum_{i=0}^d L_{(i)} \Phi^{(i)}, \quad L v_0 = \sum_{i=0}^d L_{(i)} v_0^{(i)}, \quad (6)$$

где d - порядок дифференциального уравнения (1), $L_{(i)}$ - оператор, содержащий только производные порядка i , $\Phi^{(i)}$ - матрица, компоненты которой представляют собой производные порядка i компонент матрицы Φ ; $v_0^{(i)}$ - вектор, компоненты которого представляют собой производные порядка i компонент вектора v_0 .

Подставляя соотношения (6) в систему (5) получим:

$$\left(\int_{\Omega} \left(\Phi^T \left(\sum_{i=0}^d L_{(i)} \Phi^{(i)} \right) \right) d\Omega \right) a = \int_{\Omega} \Phi^T \left(f_\Omega - \left(\sum_{i=0}^d L_{(i)} v_0^{(i)} \right) \right) d\Omega. \quad (7)$$

Построение системы уравнений (9) требует вычисления определенных интегралов и перемножения матриц, после предварительного вычисления производных Φ и v_0 , которое не вызывает принципиальных затруднений. Заметим, что вид системы

(9) не зависит от природы рассматриваемого физического процесса, который конкретизируется видом векторов v_0 , f_Ω , а также матриц L, Φ . Таким образом, использование метода Бубнова-Галеркина позволяет получать решения краевых задач при рассмотрении различных физических процессов в элементах машиностроительных конструкций при помощи единообразного алгоритма.

Сходимость последовательности приближенных решений (3) при увеличении числа N можно обосновать известным достаточным признаком сходимости метода Бубнова-Галеркина [4]: если краевая задача имеет не более одного решения, и ее оператор можно представить разложением вида:

$$L = L_0 + K, \quad (8)$$

где L_0 - положительно определенный, K - вполне непрерывный операторы, то последовательность Бубнова-Галеркина будет сходиться к точному решению в метрике оператора L_0 .

При решении задачи необходимо подбирать число пробных функций так, чтобы точность получаемого решения была приемлемой для его практического использования. В качестве оценки точности приближенного решения v_N можно рекомендовать величину:

$$R_N = \sqrt{\frac{\int_{\Omega} (Lv_N - f_\Omega)^2 d\Omega}{\int_{\Omega} d\Omega}}. \quad (9)$$

которая показывает как точно выполняются уравнения (1) краевой задачи. Также можно использовать аналогичные (9) значения, подсчитанные для отдельно взятых уравнений краевой задачи.

Примеры решения задач теории упругости и теплопроводности. Рассмотрим применение метода Бубнова-Галеркина для решения краевых задач теории упругости и теплопроводности бесконечно длинных цилиндров. Уравнения краевой задачи теории упругости бесконечно длинного цилиндра (плоская деформация) при отсутствии объемных имеют можно представить в виде (1), если:

$$v = \begin{pmatrix} \sigma_{rr} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ u_r \end{pmatrix}; f_\Omega = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; L = \begin{pmatrix} -\frac{1}{E} & \frac{\nu}{E} & \frac{d}{dr} \\ \frac{\nu}{E} & -\frac{1}{E} & \frac{1}{r} \\ -\frac{d}{dr} - \frac{1}{r} & \frac{1}{r} & 0 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где $\sigma_{rr} = \sigma_{rr}(r)$, $\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\theta\theta}(r)$, $u_r = u_r(r)$ - радиальные, окружные напряжения и радиальное перемещение, E, ν - модуль упругости и коэффициент Пуассона материала цилиндра.

Для цилиндра, нагруженного только внутренним давлением p , краевые условия имеют вид:

$$\sigma_{rr}(R_1) = -p; \sigma_{rr}(R_2) = 0, \quad (11)$$

где R_1, R_2 - внутренний и наружный радиусы цилиндра.

Уравнения краевых задач теплопроводности для бесконечного цилиндра при отсутствии внутренних источников тепла записываются в виде (1), если принять,

что:

$$v = \begin{pmatrix} q_r \\ T \end{pmatrix}; f_{\Omega} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}; L = \begin{pmatrix} 1 & -\lambda \frac{d}{dr} \\ -\frac{d}{dr} - \frac{1}{r} & 0 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где $T = T(r)$ - температура, q_r - проекция плотности теплового потока, λ - коэффициент теплопроводности материала цилиндра.

В случае, когда известны значения температуры T_1 и T_2 внутри и вне цилиндра, то граничные условия в задаче теплопроводности запишутся так

$$T(R_1) = T_1; T(R_2) = T_2. \quad (13)$$

Построив аппроксимации вида (3) для задач (10), (11) и (12), (13), используя соотношение (7) построим системы уравнений для определения коэффициентов аппроксимаций. Естественно, что построение системы (7) как в случае задачи упругости так и в случае задачи теплопроводности осуществляется одним и тем же способом. Некоторые результаты, полученных при решении рассматриваемых задач, имеющих известные аналитические решения, показаны на рис. 1 и на рис. 2. Решения

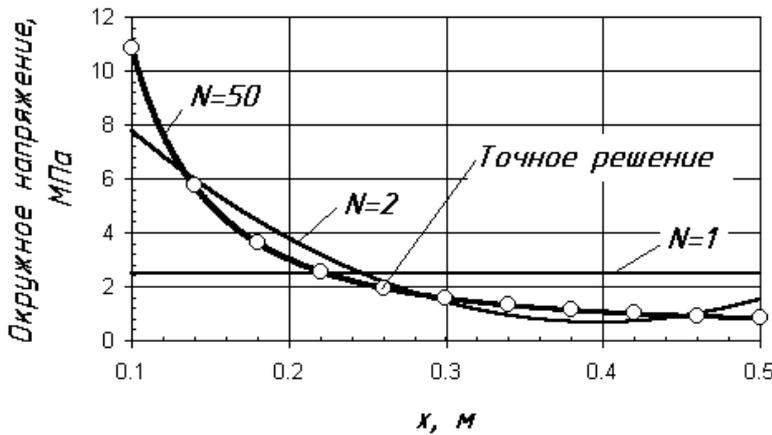


Рис. 1. Сходимость решений окружных напряжений.

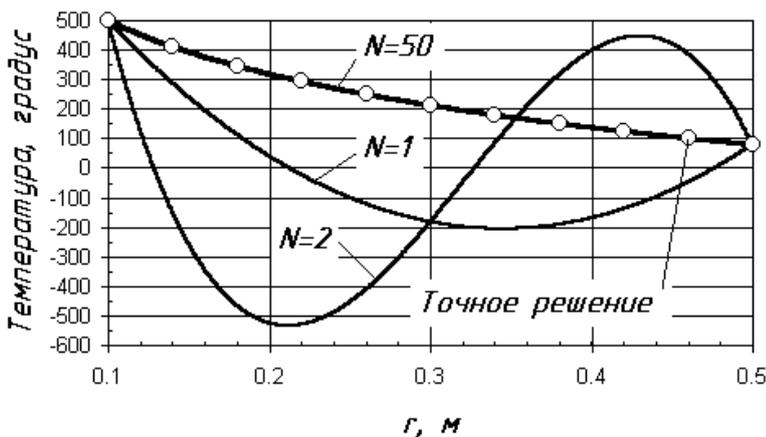


Рис. 2. Сходимость решений для температуры.

получены для случаев

$$R_1 = 0,1\text{ м}, R_2 = 0,5\text{ м}, p = 10\text{ МПа}, E = 210\text{ ГПа}, \nu = 0,3, \\ T_1 = 700^\circ, T_2 = 80^\circ, \lambda = 50\text{ Вт/м}\cdot\text{град}.$$

Выводы. Численная реализация метода Бубнова-Галеркина при анализе физически различных процессов упругого деформирования и теплопроводности не имеет принципиальных различий и базируется на однообразных алгоритмах вычисления интегралов и перемножения матриц. Приближенные решения даже при относительно малом числе пробных функций имеют достаточно высокую точность. Полученные результаты показывают целесообразность использования метода Бубнова-Галеркина для анализа физико-механических процессов в элементах конструкций при решении двумерных и трехмерных задач ползучести для прогнозирования длительной прочности энергетического и реакторного оборудования.

Литература: 1. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина. Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 352 с. 2. Рвачев В.Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения. - К.: Наук.

думка, 1982. - 566 с. 3. Ромашов Ю.В. Решение контактных задач теории упругости на основе вариационно-структурного метода для смешанного функционала Рейсснера // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. - Харьков: ХГПУ. - 2000. - Вып. 95. - С. 65-69. 4. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике. - М.: Наука, 1970. - 542 с.

УДК 539.3

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТОНКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ R-ФУНКЦИЙ

Андриевская Л.С., канд. техн. наук, Морачковская И.О., канд. техн. наук
(г. Харьков, Украина)

The problem of non-linear elastic-plastic deforming of thin surfaces is reviewed. The problem is formulated on base of incremental and deformational theories of plasticity and geometrically of non-linear theory of a bending of thin shells in a quadratic approaching. The method of the theory R-functions (RFM) is applied. The solutions of separate examples, which were definite by used the "Pole" programming system are given.

1. Актуальность темы. Задачи об изгибе тонких пологих оболочек, ослабленных отверстиями, всегда привлекали многих исследователей и инженеров. Нелинейное деформирование таких оболочек изучалось многими исследователями, однако остаются не изученными вопросы нелинейного деформирования оболочек со сложным контуром отверстий и их контуром в плане при деформировании за пределами упругости и прогибах, сопоставимых с толщиной. Один из эффективных подходов к решению таких проблем предложен в данной работе, что позволяет считать тему статьи актуальной для инженерной практики проектирования, анализа жесткости и прочности тонкостенных элементов конструкций современной реакторной, авиационной, ракетно-космической техники и т.п.

2. Анализ состояния проблемы. В исследованиях по изгибу гибких пологих оболочек преимущественно используют геометрически нелинейный вариант теории в квадратичном приближении и деформационные теории пластичности, а предпочтение в расчетах отдано разностным вариационным методам и методу конечных элементов [2-6]. В этих работах сформулированы недостатки таких подходов и методов. В статьях [3,6] представлены результаты исследований изгиба пологих оболочек со сложным контуром в плане. Исследования выполнены на основе обобщенного аналитического описания нелинейного деформирования и структур решения для задач изгиба гибких пологих оболочек, RFM [1]. Отсутствием подобных разработок для решения нелинейных задач теории пологих оболочек, ослабленных отверстиями сложной формы, сдерживается распространение RFM в расчетах современной техники.

3. Постановка и метод решения задач. В основу математической постановки задачи положим уравнения, предложенные в [4]. Рассматривая пошаговое нагружение внешним полем давлений, здесь задача о нелинейном упругопластическом деформировании оболочки сведена к поиску приращений неизвестных функций прогиба - $\dot{w}_{(k)}$ и мембранных сил - $\dot{\phi}_{(k)}$ оболочки:

$$\delta I_{(k)} = 0, \quad (1)$$

$$I_{(k)} = \int_S \left\{ \frac{1}{2} D_1 \left(\dot{w}_{(k),11}^2 + \dot{w}_{(k),22}^2 \right) + (D_1 - D_2) \dot{w}_{(k),11} \dot{w}_{(k),22} + D_2 \dot{w}_{(k),12}^2 - \right.$$

$$\begin{aligned}
& -(S_1 + S_2) \left(\dot{\phi}_{(k),22} \dot{w}_{(k),11} + \dot{\phi}_{(k),11} \dot{w}_{(k),22} \right) - S_2 \left(\dot{\phi}_{(k),11} \dot{w}_{(k),11} + \dot{\phi}_{(k),22} \dot{w}_{(k),22} \right) + \\
& - 2S_1 \dot{\phi}_{(k),12} \dot{w}_{(k),12} - \frac{1}{2} H_1 \left(\dot{\phi}_{(k),22}^2 + \dot{\phi}_{(k),11}^2 \right) - (H_1 - H_2) \dot{\phi}_{(k),11} \dot{\phi}_{(k),22} - H_2 \dot{\phi}_{(k),12}^2 - \\
& - \left(k_1 \dot{\phi}_{(k),22} + k_2 \dot{\phi}_{(k),11} \right) \dot{w}_{(k)} - \dot{\phi}_{(k),11} \dot{w}_{(k),22} w_{(k-1)} - \dot{\phi}_{(k),22} \dot{w}_{(k),11} w_{(k-1)} + \\
& + 2\dot{\phi}_{(k),12} \dot{w}_{(k),12} w_{(k-1)} - \frac{1}{2} \dot{w}_{(k)} \dot{w}_{(k),22} \varphi_{(k-1),11} - \frac{1}{2} \dot{w}_{(k)} \dot{w}_{(k),11} \varphi_{(k-1),22} + \\
& + \frac{1}{2} \dot{w}_{(k)} \dot{w}_{(k),12} \varphi_{(k-1),12} - Q \frac{1}{2} \dot{w}_{(k)} \} dS.
\end{aligned} \tag{2}$$

Физические соотношения записаны в виде, соответственном для теории малых упруго-пластических деформаций:

$$N = [B]e + [C]\chi, \quad M = [C]e + [Y]\chi, \tag{3}$$

где $N^T = (N_1, N_2, S)$, $M^T = (M_1, M_2, H)$ – внутренние силовые факторы, действующие в срединной поверхности оболочки при изгибе, $[B]$, $[C]$, $[Y]$ – матрицы с элементами, которые являются интегралами от функций, зависящих от переменных параметров упругости по толщине:

$$\begin{aligned}
b_{11} = b_{22} &= \int \frac{\bar{E}}{(h)1 - \bar{\nu}^2} dz, \quad b_{12} = b_{21} = \int \frac{\bar{E}\bar{\nu}}{(h)1 - \bar{\nu}^2} dz, \quad b_{33} = \frac{1}{2} \int \frac{\bar{E}}{(h)1 + \bar{\nu}} dz, \\
c_{11} = c_{22} &= \int \frac{\bar{E}}{(h)1 - \bar{\nu}^2} z dz, \quad c_{12} = c_{21} = \int \frac{\bar{E}\bar{\nu}}{(h)1 - \bar{\nu}^2} z dz, \quad c_{33} = \frac{1}{2} \int \frac{\bar{E}}{(h)1 + \bar{\nu}} z dz. \\
Y_{11} = Y_{22} &= \int \frac{\bar{E}}{(h)1 - \bar{\nu}^2} z^2 dz, \quad Y_{12} = Y_{21} = \int \frac{\bar{E}\bar{\nu}}{(h)1 - \bar{\nu}^2} z^2 dz, \\
Y_{33} &= \frac{1}{2} \int \frac{\bar{E}}{(h)1 + \bar{\nu}} z^2 dz, \quad \bar{E} = \frac{\psi}{1 + \frac{\psi}{9K}}, \quad \bar{\nu} = \frac{\frac{1}{2} - \frac{\psi}{9K}}{1 + \frac{\psi}{9K}}.
\end{aligned} \tag{4}$$

Переменные параметры упругости связаны с соотношениями $\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_i)$ для соответствующей диаграммы деформирования материала оболочки:

$$\psi = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}, \quad K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}, \tag{5}$$

где $\sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\sigma_{xy}^2}$ – интенсивность напряжений Мизеса, E , ν – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала, ψ , K – секущий и объемный модули.

Решения на предыдущих шагах в виде приращений функций прогиба $\dot{w}_{(k)} \Delta p_{(k)}$ и мембранных сил $\dot{\phi}_{(k)} \Delta p_{(k)}$ используем при решении задач вида (1), (2) для последующего шага догрузки:

$$p_{(k)} = \sum_i^k \Delta p_{(i)}, \quad \phi_{(k)} = \sum_i^k \dot{\phi}_{(i)} \Delta p_{(i)}, \quad w_{(k)} = \sum_i^k \dot{w}_{(i)} \Delta p_{(i)}. \tag{6}$$

Коэффициенты равенств (1) и (2) подсчитываются по уже найденным $w_{(k-1)}$, $\phi_{(k-1)}$, данным о решении задачи на предыдущем шаге догрузки, отвечающим (6). На

каждом шаге значения напряжений ($\sigma_{33} = \sigma_z = 0$) уточняются с использованием диаграммы деформирования материала оболочки. Для этого используется внутренний итерационный цикл ($m = 0, 1, \dots, M$):

$$\begin{aligned} \varepsilon_{z(k-1)}^{(m)} &= -\frac{1-\alpha^{(m)}}{1+2\alpha^{(m)}} \left[\left(e_{1(k-1)} + e_{2(k-1)} \right) + z \left(\chi_{1(k-1)} + \chi_{2(k-1)} \right) \right], \\ \alpha^{(m)} &= \frac{2}{9} \frac{E_c^{(m)}}{K}, \quad E_c^{(m+1)} = \frac{\sigma_u \left(\varepsilon_u^{(m)} \right)}{\varepsilon_u^{(m)}}, \quad E_c^0 = 3G, \\ C^{(m)} &= 1 + \frac{3}{\left(1 + 2\alpha^{(m)} \right)^2}, \quad D^{(m)} = 1 - \frac{3}{\left(1 + 2\alpha^{(m)} \right)^2}, \\ P_\varepsilon^{(m)} &= \frac{1}{4} \left[C^{(m)} \left(e_{1(k-1)}^2 + e_{2(k-1)}^2 \right) - 2D^{(m)} e_{1(k-1)} e_{2(k-1)} + \gamma_{(k-1)}^2 \right], \\ P_{\varepsilon\chi}^{(m)} &= \frac{1}{4} \left[C^{(m)} \left(\chi_{1(k-1)} e_{1(k-1)} + \chi_{2(k-1)} e_{2(k-1)} \right) - D^{(m)} \left(\chi_{21(k-1)} e_{1(k-1)} + \chi_{1(k-1)} e_{2(k-1)} \right) + 2\chi_{12(k-1)} \gamma_{(k-1)} \right], \\ P_\chi^{(m)} &= \frac{1}{4} \left[C^{(m)} \left(\chi_{1(k-1)}^2 + \chi_{2(k-1)}^2 \right) + 2D^{(m)} \chi_{1(k-1)} \chi_{2(k-1)} + 4\chi_{12(k-1)}^2 \right], \\ \varepsilon_{\dot{e}(k-1)}^{(m)} &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{P_\varepsilon^{(m)} + 2zP_{\varepsilon\chi}^{(m)} + z^2P_\chi^{(m)}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Процесс итераций по формулам (7) завершается при выполнении неравенства:

$$\left(\varepsilon_{\dot{e}(k-1)}^{(m+1)} - \varepsilon_{\dot{e}(k-1)}^{(m)} \right)^2 / \left(\varepsilon_{\dot{e}(k-1)}^{(m)} \right)^2 < \delta,$$

где δ – заданная величина точности.

Далее рассматривалось решение вариационных равенств (1), (2) по методу РФМ [3-5]. Основой РФМ являются структуры решений. В работе на базе известных в теории R-функций методов предложены структуры для типичных краевых условий. Так, например, для области оболочки в плане Ω с границей Γ , которая описывается нормализованной до первого порядка функцией $\omega(x, y)$ и удовлетворяет условиям: $\omega(x, y) \geq 0$, $\forall (x, y) \in \Omega$, $\omega_n = 1$, $\forall (x, y) \in \Gamma$, рассмотрены структуры решений для разных закреплений [3-4]. В структурах полные системы функций приняты степенными полиномами. Для функционала (1), заданного на функциях $\dot{w}_{(k)}$, $\dot{\varphi}_{(k)}$, неопределенные коэффициенты структур отыскиваются прямым вариационным методом Ритца. Для расчетов тонких оболочек в системе «Поле» интегрированием в объеме оболочек вычислялись коэффициенты разрешающих систем Ритца. Для этого использованы высокоточные k -узловые квадратурные формулы Гаусса при интегрировании в двумерной области и 5-ти, 7-ми -узловые формулы Ньютона – Котесса при интегрировании по толщине.

4. Результаты и их анализ. В качестве примера рассмотрим задачу об изгибе сферического днища толщиной $h = 2$ мм с малым отверстием радиуса r_0 под действием наружного давления P . Внешний контур днища принят жестко закрепленным и его радиус равен $R = 2000$ мм.

Расчеты выполнены с целью изучения закономерности по влиянию размещения отверстия в днище на его напряженное состояние. Отверстие в днище образовано цилиндрическим трубопроводом с диаметром $2r_0 = 0,2R$, который жестко скреплен с обечайкой днища. Структуры решения, точно удовлетворяющие граничным услови-

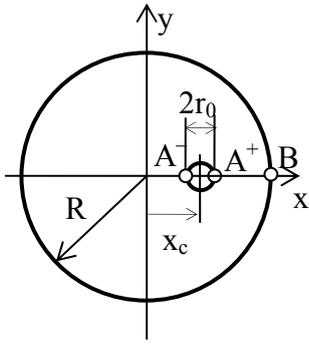


Рис.1 Днище с отверстием.

ям, приняты в виде:

$$\varphi_k = \omega^2 P_1(x, y), \quad w_k = \omega^2 P_2(x, y),$$

где $\omega = \omega_1 \wedge \omega_2$, ω_1, ω_2 - R-функции для уравнений контуров отверстия и наружного края оболочки в плане, $P_1(x, y), P_2(x, y)$ - свободные компоненты структур, выбранные в виде степенных полиномов.

На рис. 1 показаны характерные точки на внутренней поверхности оболочки, точки A^-, A^+ образованы пересечением центральной радиальной прямой оболочки с краем отверстия, а точка B - пересечением этой же прямой с краем днища. Варированию подлежала координата центра отверстия - x_c : (0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8) R.

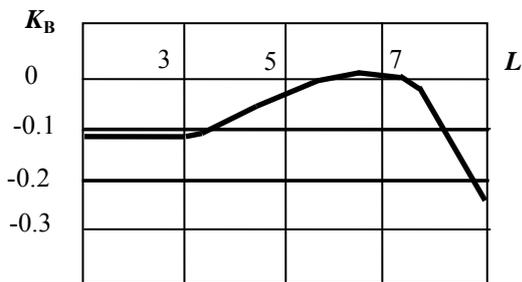


Рис. 2. Напряжения σ_y в точке B днища при изменении x_c .

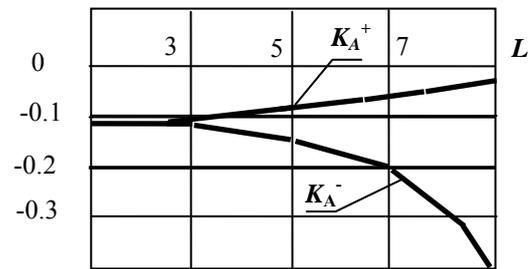


Рис. 3. Напряжения σ_y в точках A^-, A^+ днища при изменении x_c .

Результаты расчетов представлены на рис. 2. Здесь в безразмерных величинах приведены данные об изменении значений нормальных напряжений на внутренней поверхности днища: $K_B = \sigma_y(0, R)$, соответственно в точке B днища, в зависимости от параметра L , равного отношению длины «перемычки» к величине радиуса отверстия $L = 1 + (R - x_c) / r_0$. Законы изменения значений нормальных напряжений, соответственно в точках A^-, A^+ : $K_{A^\pm} = \sigma_y(0, x_c \pm r_0)$, в зависимости от параметра L , представлены на Рис. 3. Анализ этих данных позволяет установить, что при сближении контуров отверстия и днища происходит перераспределение напряжений. В крайних точках A^+ и B «перемычки» концентрация напряжений падает, а в смежной точке контура отверстия A^- - концентрация напряжений возрастает.

Расчеты выполнены по представленному в данной статье алгоритму с использованием программирующей системы «Поле». Результаты, отвечают малым перемещениям ($w/h < 0.25$), что при заданной точности вычислений $\delta \leq 0.025$, обеспечивало быструю сходимость при двух итерациях на каждом из десяти шагов по параметру нагружения.

5. Выводы. Вариационно-структурный метод (RFM) применен для численного исследования нелинейного деформирования оболочек со сложным контуром отверстий и их контуром в плане при деформировании за пределами упругости и прогибах, сопоставимых с толщиной. Предложено обобщение ранее выполненных исследований по расчету упругопластического изгиба гибких тонких пологих оболочек с

использованием программирующей системы «Поле». Выполнены исследования по влиянию размещения малого кругового отверстия в тонком сферическом днище, находящемся под внешним давлением, на напряженное состояние днища.

Литература: 1. Рвачев В.Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения. – Киев: Наук. думка, 1982. – 552 с. 2. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. - М., Машиностроение, 1975. - 400 с.3. Курпа Л.В., Морачковська І.О. Розрахунок гнучких пологих оболонок скрадної форми в плані при пружнопластичному згині // Машинознавство. - Львів. – 2000. - №3 (33). - С. 21 – 26. 4. Морачковская И.О. Метод R-функций для решения задач упруго-пластического изгиба пологих оболочек сложной формы в плане // Вестник Харьковского унів-ту. Серія: Актуальні проблеми сучасної науки в дослідженнях молодих учених г.Харькова. – 2000. – №456. –Ч.2. – С. 276–279. 5. Андрієвська Л.С., Морачковська І.О. Методика розв'язання нелінійних задач згину пологих оболонок із складним планом // Комунальне господарство міст / Науково-техн. зб., серія: Архітектура і технічні науки. - Київ: Техніка, вып.38, 2002, с. 52-57.6 Морачковская И.О. Метод теории R- функций в задачах упруго-пластического изгиба пологих оболочек// Вестник НТУ «ХПИ». – 2004. – №31. – С. 65 – 68

УДК 539.3

РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С НЕОДНОРОДНОЙ ПО ТОЛЩИНЕ СТРУКТУРОЙ

Сало В.А., докт. техн. наук, (г. Харьков, Украина)

The approach is suggested to definition of the stress-strained state of non-uniform shells. The used RVR-method is based on Reissner's variational principle, I.N.Vekua's method, R-functions theory, the common equations of the three-dimensional theory of an elasticity and algorithm for two-sided estimation of exactitude of approached solutions of the mixed variational problems. Efficiency of the method is shown on examples.

Постановка проблемы. В настоящее время перспективы прогресса в машиностроении связываются, в основном, с разработкой и широким применением неоднородных по своей структуре композиционных материалов (композитов) [1], открывающих широкие возможности, как для совершенствования существующих конструкций самого разнообразного назначения, так и для разработки новых конструкций и технологических процессов. Интенсивный рост применения композитов в ответственных элементах конструкций современной техники обусловлен, прежде всего, большими возможностями композитов при решении указанных проблем. Многообразие этих возможностей предопределяются высокими удельными прочностью и жесткостью; низкой плотностью; высокой технологичностью изготовления цельных весьма крупногабаритных изделий; реализацией в процессе производства элементов конструкций направленного уровня физико-механических свойств материалов; наличием ряда специфических свойств. Для реализации этих возможностей необходимы умение прогнозировать и проектировать физико-механические свойства композитов, а также эффективные и надежные методы расчета напряженно-деформированного состояния элементов конструкций, изготовленных из материалов неоднородной структуры. Поэтому разработка эффективных методов расчета на прочность и жесткость неоднородных оболочечных элементов (одних из наиболее ответственных конструктивных элементов) является актуальной проблемой, решение которой имеет важное научное и практическое значение.

В современной технике оболочки с отверстиями являются одними из наиболее ответственных конструктивных элементов, от прочности и жесткости которых зави-

сит работоспособность и надежность конструкции в целом. Прогресс в разработке научно обоснованных методов, позволяющих получить достоверные результаты расчетов многосвязных оболочек, невозможен без привлечения современных ПЭВМ. В этой связи актуальна потребность в создании достаточно универсальных и алгоритмически простых для численной реализации методов расчета оболочек с криволинейными отверстиями произвольных размеров.

Анализ последних исследований и публикаций. В научной литературе накоплен обширный материал по методам расчета на прочность и жесткость упругих оболочек, построено большое число разнообразных и нередко противоречащих друг другу вариантов прикладных теорий оболочек. В монографии [2] для определения концентрации напряжений около отверстий в статически нагруженных упругих оболочках предлагается использовать разработанный автором эффективный численно-аналитический RVR-метод, основанный на применении вариационного принципа Рейсснера, общих уравнений теории упругости, метода И.Н.Векуа, алгоритма двусторонней оценки точности приближенных решений смешанных вариационных задач и математического аппарата R-функций, с помощью которых на аналитическом уровне учитывается геометрическая информация краевых задач и строятся структуры решений, точно удовлетворяющие всем граничным условиям. Одна из перспективных возможностей RVR-метода [2] связана с его применением для расчета неоднородных оболочек в случае зависимостей упругих характеристик материала от координат точек тела в виде известных функций.

Цель и постановка задачи. Рассмотрим оболочку с неоднородной по толщине структурой. Краевым задачам для таких оболочек посвящены немногие работы, в частности, в [3] методом И.Н. Векуа получены уравнения равновесия неоднородной изотропной сферической оболочки постоянной толщины, а в [4] исследовано напряженное состояние неоднородной по толщине пологой трансверсально-изотропной сферической оболочки с круговым отверстием, на боковой поверхности которого приложены нелинейно изменяющиеся тангенциальные касательные напряжения.

Без ограничения общности в исследовании оболочки многомерной неоднородной структуры будем в дальнейшем считать, что коэффициенты Пуассона ν_{ij} постоянны, а модули упругости E_i и сдвига G_{ij} (при $i \neq j = \overline{1,3}$) – произвольные функции поперечной координаты ζ ($|\zeta| \leq 1$):

$$E_i = E_i^0 f_i(n, \delta, \zeta); \quad G_{ij} = G_{ij}^0 f_{ij}(n, \delta, \zeta), \quad (1)$$

где E_i^0 , G_{ij}^0 – постоянные величины; n , δ – параметры, характеризующие неоднородность материала.

В работе [4], например, $f_i(n, \delta, \zeta)$ и $f_{ij}(n, \delta, \zeta)$ – линейные (при $n = 1$) функции толщинной координаты ζ , а в [5] представлены примеры различных законов изменения модуля сдвига и коэффициента Пуассона от одной декартовой координаты при построении так называемых «общих решений» уравнений теории упругости неоднородных сред.

Отметим, что одномерный вариант (1) неоднородности – один из наиболее распространенных в научной литературе, в то же время рассмотрение более общей (например, от всех трех координат) зависимости упругих характеристик материала

оболочки не вносит принципиальных затруднений при использовании разработанного численно-аналитического RVR-метода [2]. Функции $f_i(n, \delta, \zeta)$ и $f_{ij}(n, \delta, \zeta)$ в соотношениях (1) могут принимать для конкретного материала исследуемой неоднородной оболочки разный вид. В частности, остановимся на используемых нами численных расчетах следующих вариантах распределения (при заданных значениях параметров n и δ) функций $f_i(\zeta) = E_i/E_i^0$ (аналогично $f_{ij}(\zeta) = G_{ij}/G_{ij}^0$) вдоль толщины оболочки:

$$\left. \begin{aligned} (a) : f_i(\zeta) &= 1 - 0.25(1 + \zeta); & (b) : f_i(\zeta) &= 1 - 0.0625(1 + \zeta)^3; & (c) : f_i(\zeta) &= e^{0.25(1 + \zeta)^2 \ln 2}; \\ (d) : f_i(\zeta) &= \frac{e^{1 + \zeta}}{1 + (e^2 - 0.5)(1 + \zeta)}; & (e) : f_i(\zeta) &= 1 + \ln[1 + 0.5(e - 1)(1 + \zeta)]. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В выражениях (2) функция $f_i(\zeta)$ имеет линейный (2a), кубический (2b), экспоненциальный (2c), экспоненциально-степенной (2d) либо логарифмический (2e) законы изменения вдоль толщины оболочки.

Выполним расчет напряженно-деформированное состояние нагруженной постоянным внутренним давлением q_0 неоднородной сферической оболочки с геометрическими и физическими параметрами, рассмотренными в работе [6]. Введем в срединной поверхности Ω_s радиуса R оболочки криволинейную ортогональную систему координат $\{\theta, \varphi, z\}$. Поверхность Γ оболочки состоит из боковых поверхностей Γ_s ($\theta = \theta_s$, $s = 1, 2$) двух полюсных круговых отверстий одинакового радиуса r_0 и лицевых Γ^\pm ($z = \pm h/2$ при $\zeta = 2z/h$) поверхностей. Будем считать, что отверстия закрыты крышками такой конструкции, которая передает на оболочку действие перерезывающей силы $Q_\theta^* = -0.5q_0r_0$, величина которой определяется из условия равновесия крышки. Пусть коэффициенты Пуассона постоянны ($\nu_{ij} = 0.3$), а модули упругости E_i и сдвига G_{13} – функции толщинной координаты ζ вида (1), где постоянные величины E_i^0 и G_{13}^0 принимают значения упругих характеристик однородной оболочки:

$$E_1^0 = E_3^0 = 20E_0; \quad G_{13}^0 = E_0; \quad E_0 = 1 \text{ ГПа}. \quad (3)$$

Введем безразмерную координату $r_\theta = (r_0 + (\theta - \theta_1)R)/r_0$, приведенные перемещения \tilde{u}_i и напряжения $\tilde{\sigma}_{ij}$:

$$\tilde{u}_i = 100u_i/h, \quad \tilde{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij}/q_0, \quad (4)$$

принимающие в случае вычисления при $\zeta = -1$, $\zeta = 0$ или $\zeta = 1$ соответственно вид \tilde{u}_i^- , \tilde{u}_i^0 или \tilde{u}_i^+ (аналогично $\tilde{\sigma}_{ij}^-$, $\tilde{\sigma}_{ij}^0$ или $\tilde{\sigma}_{ij}^+$).

Обозначим $p_0 = q_0R/2h$. Определяемые по формулам (4) приведенные напряжения совпадают с точностью до множителя $2h/R$ с используемыми в научной практике коэффициентами концентрации k_θ и k_φ :

$$k_\theta = \frac{\sigma_\theta}{p_0} = \frac{\sigma_{11}}{q_0} \frac{2h}{R} = \tilde{\sigma}_{11} \frac{2h}{R}; \quad k_\varphi = \frac{\sigma_\varphi}{p_0} = \frac{\sigma_{22}}{q_0} \frac{2h}{R} = \tilde{\sigma}_{22} \frac{2h}{R}, \quad (5)$$

которые в случае вычисления при $\zeta = -1$, $\zeta = 0$ и $\zeta = 1$ принимают соответственно вид $k_{\theta}^{-} = \sigma_{11}^{-}/p_0$, $k_{\theta}^0 = \sigma_{11}^0/p_0$ и $k_{\theta}^{+} = \sigma_{11}^{+}/p_0$ (аналогично для коэффициента k_{φ}).

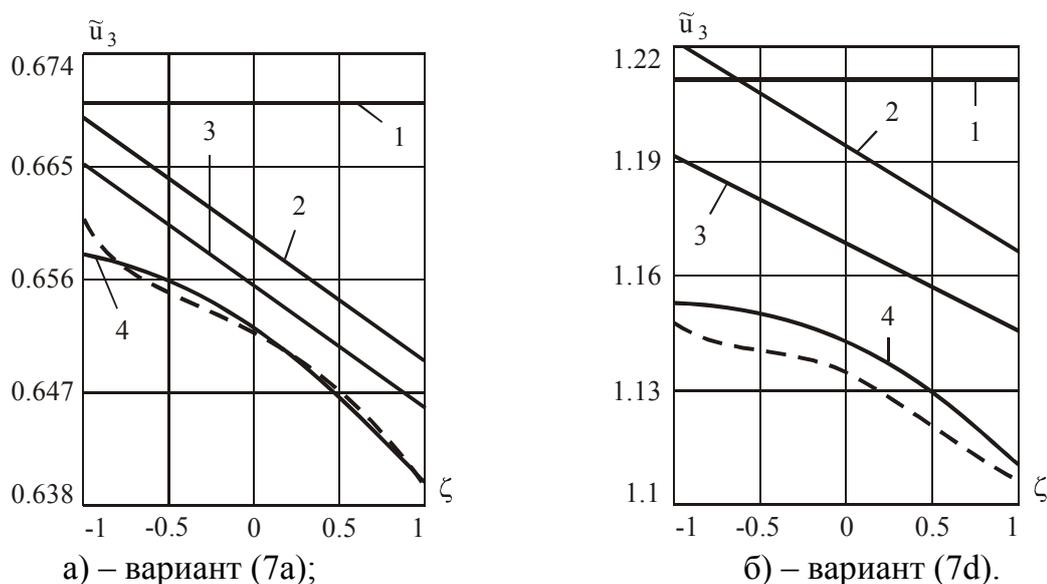


Рис. 1. Распределение перемещения \tilde{u}_3 вдоль толщины ζ ($r_0=1$).

Цифры 1, 2, 3 и 4 возле графиков рис. 1 соответствуют применяемым сдвиговым моделям (2, 1, 2, 1, 0), (2, 2, 2, 2, 1), (4, 2, 4, 2, 1) и (4, 3, 4, 3, 2) уточненных оболочек [2]; при этом штриховой линией показан график на основе результатов, полученных при использовании модели уточненной теории оболочек седьмого приближения.

Выводы. Как следует из представленных результатов, искомое напряженно-деформированное состояние неоднородной оболочки существенно зависит от того, насколько закон изменения упругих характеристик материала оболочки отличается от их линейного распределения по толщине оболочки. Поэтому при расчете неоднородной оболочки с нелинейным законом изменения упругих характеристик по толщине для получения достоверных результатов следует использовать модель уточненной теории более высокого порядка приближения.

Полученные результаты подтверждают возможность эффективного использования предложенного численно-аналитического RVR-метода [2] при расчете оболочек с неоднородной по толщине структурой. Средством проверки достоверности результатов может стать программно реализованный алгоритм [2] интегральной двойственной оценки получаемых приближенных решений.

Литература: 1. Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. Композиционные материалы. – М.: Машин-е, 1990. – 512 с. 2. Сало В.А. Краевые задачи статики оболочек с отверстиями. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 216 с. 3. Жгенти В.С. К исследованию напряженного состояния изотропных толстостенных оболочек неоднородной структуры // Прикладная механика. – Киев, 1991. – Т. 27, № 5. – С. 37–44. 4. Хома И.Ю. Напряженное состояние неоднородной трансверсально-изотропной сферической оболочки с круговой полостью при заданных нелинейно изменяющихся касательных напряжениях // Прикладная механика. – Киев, 1996. – Т. 32, № 12. – С. 55–63. 5. Плевако В.П. Общие решения в задачах теории упругости неоднородных сред. – Харьков: Основа, 1997. – 160 с. 6. Сало В.А., Слесар Е.П. Расчет неоднородных оболочек на основе RVR-метода // Труды 9-й межд. науч-техн. конф. «Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве». – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2004. – С. 123–125.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ТОНКОСТЕННЫХ МЕТАЛЛОВ

Батыгин Ю.В., докт. техн. наук, **Бондарь С.В.**, канд. техн. наук,

The present work is dedicated to account of the possible directions physical bases of the magnetic pulse force action practical usage on the thin-walled metal objects. The suggested directions and according methods are united by common name of the operation being fulfilled (the flat stamping).

Магнитно-импульсная обработка металлов открывает широкие возможности для создания новых технологий, обладающих всеми признаками прогрессивных технологий: экологическая чистота, высокая производительность, экономный расход материальных и энергетических ресурсов. Практические апробации магнитно-импульсных методов, их достоинства и промышленные применения достаточно полно описаны авторами [1]. Несмотря на широкий круг проблем, решаемых с использованием энергии электромагнитных полей, современное производство требует дальнейшего расширения видов технологических процессов, где магнитно-импульсные методы имеют преимущества в сравнении с известными механическими или химическими способами [2].

Настоящая работа посвящена изложению физических основ направлений практического использования методов магнитно-импульсного силового воздействия на тонкостенные металлические объекты, т.е. объекты, геометрическая толщина которых существенно меньше эффективной глубины проникновения поля в соответствующую проводящую среду. Данные направления развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов инициированы работами, проводимыми в НТУ "Харьковский Политехнический институт".

Предлагаемые направления и, соответственно, методы объединяются общностью названия выполняемой операции - это плоская штамповка и общностью физической идеи для их реализации - это создание в индукторной системе заданного пространственно-временного распределения напряжённости магнитного поля. Их различие устанавливается направленностью пондермоторных сил по отношению к объекту обработки.

Первое возможное направление предлагаемого использования энергии импульсных магнитных полей - это создание давления на плоский металлический лист, направленного от индуктора к объекту обработки и позволяющего производить штамповку или вырубку заданного рисунка без каких-либо с ним механических контактов [2]. Физический механизм полевого воздействия состоит в создании определённых граничных условий для компонент вектора электромагнитного поля на поверхностях металлического листа, позволяющих достичь такой же эффективности силового воздействия, как и в случае идеальной проводимости объекта.

Сущность механизма иллюстрируется рис.1 и заключается в использовании явления, по которому поле плоской электромагнитной волны практически не проникает в свободное полупространство сквозь тонкостенные проводящие экраны. На практике этот механизм реализуется с помощью индукторных систем, где штамповка листовой заготовки производится на диэлектрическую матрицу.

Данная физическая идея и её практическое воплощение были положены в основу предложений по созданию новой прогрессивной технологии магнитно-импульсного изготовления печатных плат для компоновки схем электротехнических

приборов разного назначения. Операция по штамповке рисунка печатной платы для зарядно-выпрямительного устройства микрокалькулятора серии "Электроника" была апробирована экспериментально и дала положительные результаты.

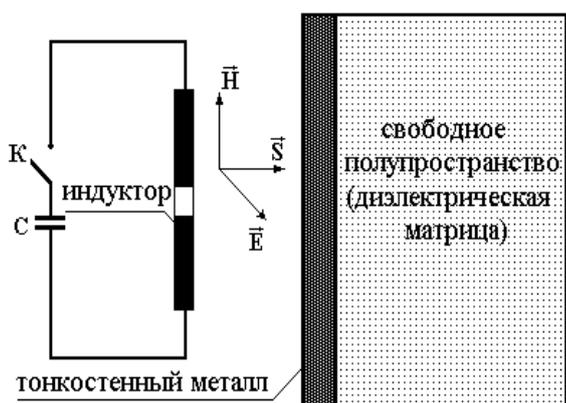


Рис.1

Второе возможное направление предлагаемого использования энергии импульсных магнитных полей для обработки тонкостенных металлов состоит в создании сил притяжения, направленных к индуктору. Практическим приложением этого направления может быть операция по удалению вмятин в металлических обшивках автомобильных кузовов и самолётов без каких-либо механических контактов с ними и повреждения их возможного внешнего лакокрасочного покрытия. Следует отметить более глубокий

смысл направления по осуществлению магнитно-импульсного притяжения металлов. Он состоит в значительном расширении возможностей полевых методов воздействия на обрабатываемые объекты. Притяжение заданных участков в комбинации с возбуждением сил давления может дать новые решения по созданию гибких прогрессивных технологий будущего. Известны технические решения по практическому осуществлению операции рихтовки самолётных корпусов, предложенные, в основном, инженерами концерна "Боинг" и фирмы "Электроимпакт" (обе - США). Их сущность состоит в суперпозиции низкочастотного и высокочастотного магнитных полей разного направления на заданном участке обрабатываемого объекта. Практическая реализация такого решения требует наличия двух источников мощности, достаточно сложных схем управления, систем высоковольтной электроники и т.д.

Проблема притяжения листовых металлов с помощью силового воздействия со стороны электромагнитных полей может быть решена проще. Первое предложение состоит в использовании закона Ампера, в соответствии с которым параллельные проводники с одинаково направленными токи взаимно притягиваются. Наиболее простым техническим решением может быть решение, предполагающее электрический контакт с листовым металлом в заданной зоне притяжения. В этом случае токопровод индуктора и участок объекта обработки будут представлять собой параллельные проводники, по которым текут одинаково направленные токи. Их взаимодействие приведёт к появлению мощных электродинамических усилий.

Графическая иллюстрация предлагаемого решения представлена на рис.2. Безусловно, данная схема обладает и недостатком, связанным с наличием электрических контактов в зоне притяжения. Этот факт существенно снижает значимость данного предложения в практическом использовании.

Более практичными представляются решения, не требующие никаких электрических или механических контактов в заданной зоне притяжения поверхности листового металла. Первое из них предполагает взаимное притяжение проводников с индуцированными токами одинакового направления. Тот же принцип, что и в схеме с электрическими контактами в заданной зоне притяжения листового металла (закон Ампера), но с существенным отличием. Вместо прямого пропускания тока через металл обрабатываемого объекта в нём индуцируются токи Фуко.

Реализация предложения о притяжении проводников с индуцированными токами иллюстрируется схемой на рис.3. При протекании импульса тока в разрядном контуре с индуктором в экране и обрабатываемом листовом металле индуцируются одинаково направленные токи.

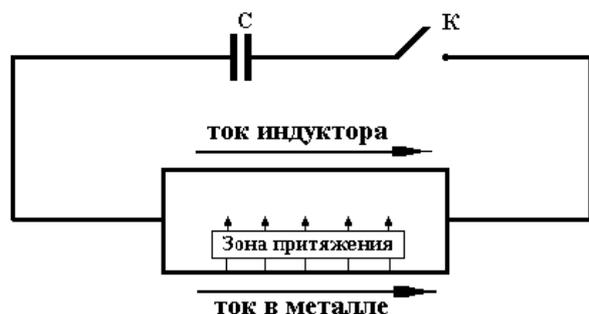


Рис.2.

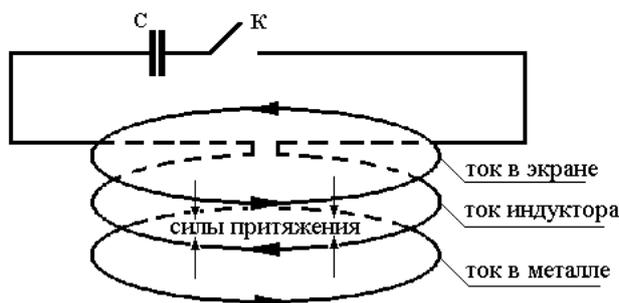


Рис.3.

Проводники с этими токами должны испытывать взаимное притяжение. Данная схема с притяжением проводников, по которым протекают одинаково направленные индуцированные токи, была апробирована экспериментально.

Второе техническое решение по бесконтактному притяжению заданных участков тонкостенных проводников предполагает возбуждение мощной нормальной компоненты напряжённости магнитного поля в металле обрабатываемого объекта. Этот физический эффект имеет место в центральной области цилиндрических индукторных систем с достаточно тонкими листовыми заготовками. Но для его максимально возможного проявления необходимо, в основном, определённый выбор геометрии витка индуктора и амплитудно-временных параметров действующего поля.

В этом случае при взаимодействии нормальной компоненты напряжённости магнитного поля с индуцированными азимутальными вихревыми токами в металле обрабатываемого объекта появляются радиальные пондеромоторные силы, направленные к геометрическому центру индукторной системы. Эти силы создают изгибающие механические моменты, создающие притяжение участка листа металла в полость витка индуктора.

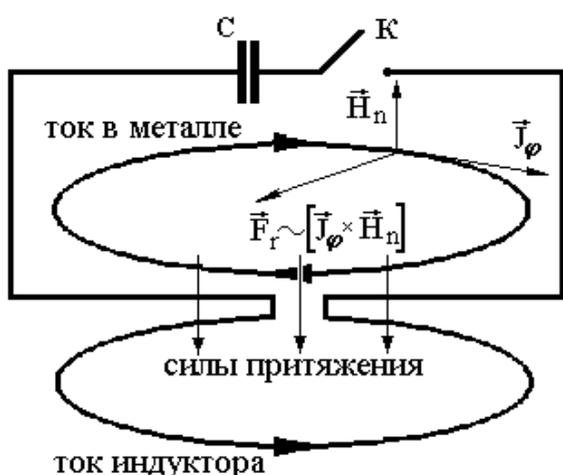


Рис.5

Графическая иллюстрация эффекта возникновения радиальных пондеромоторных сил, соответствующих изгибающим механическим моментам и сил притяжения в металле листовой заготовки представлена на рис.5, (\vec{F}_r - радиальная компонента пондеромоторной силы; \vec{J}_φ - азимутальная составляющая плотности индуцированного тока; \vec{H}_n - нормальная компонента напряжённости магнитного поля).

Соответствующие модели индукторных систем были апробированы в реальных условиях силового воздействия на образцы из листовых сталей.

Литература: 1. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Т. 1. Харьков: Изд. НТУ "ХПИ". -2001. -272с. 2. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Магнитно-импульсная обработка тонкостенных металлов. Т. 2. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Харьков: Изд. МОСТ-Торнадо. -2002. -284с.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРМОУПРУГОГО СОСТОЯНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВНЫХ МАТРИЦ

Лавинский Д.В., докт. техн. наук, Егурнов О.Р. (г. Харьков, Украина)

The firmness analyzing problem of the composite bandaging die for stamping of materials are considered in this work. The conical die with support on fundament is the investigation object. The influence of different components of die heating on the die stress state was considered.

При анализе прочности и жесткости различных конструкций одним из центральных вопросов является обоснованный выбор расчетных схем. Современный уровень развития вычислительной техники обуславливает широкое применение различных численных методов анализа напряженно-деформированного состояния. Использование численных методов подразумевает как можно более полный учет реальных геометрических параметров конструкции, условий закрепления и нагружения.

Так, при расчете составных матриц для выдавливания центральными вопросами являются: учет контактного взаимодействия между составными частями матрицы и между матрицей и деформируемой заготовкой, учет упруго-пластического деформирования заготовки, учет неравномерно распределенного температурного поля. При пластическом деформировании заготовки происходит выделение тепла [1].

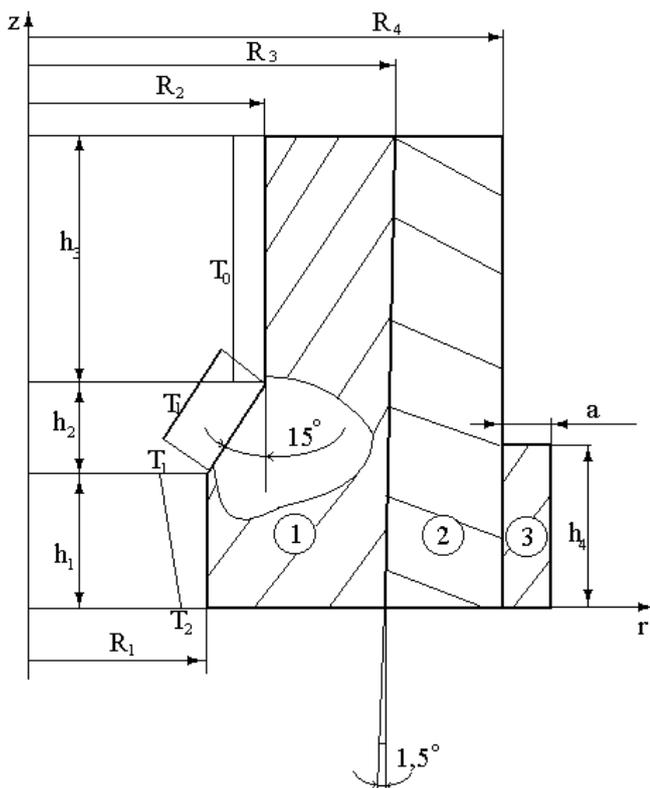


Рис.1. Расчетная схема.

Следствием этого является то, что детальный анализ напряжённого состояния различных видов матриц штампов приводит к необходимости предварительного решения задачи теплопроводности. Поэтому определённый интерес представляет выяснение влияния на напряжённое состояние дополнительного теплового воздействия, связанного с пластическим деформированием заготовки.

Для оценки степени влияния дополнительного тепловыделения на напряженное состояние матрицы в данной работе рассматривается термоупругое деформирование составной бандажированной матрицы, одна из возможных расчётных моделей которой приведена на рис. 1, где приведены геометрические параметры и параметры температурного нагружения. Следует отметить, что расчётная схема, содержит основные конструктивные элементы, встречающиеся в конструкциях составных бандажированных матриц: рабочую вставку - 1 (материал сталь Х12М, $E = 2,2 \cdot 10^5$ МПа, $\alpha = 11,2 \cdot 10^{-6}$, $\nu = 0,3$) и бандаж - 2,3 (материал сталь 35ХГСА, $E = 1,98 \cdot 10^5$ МПа, $\alpha = 12,2 \cdot 10^{-6}$, $\nu = 0,31$).

Специфика силового и теплового нагружений позволяют рассматривать эту

расчетную схему в рамках осесимметричной задачи. При решении задачи теплопроводности примем следующие допущения. Матрицу будем рассматривать отдельно от заготовки. Ее влияние на поле температур в матрице можно представить температурой заготовки, которая неравномерно распределяется по участкам внутренней поверхности рабочей вставки.

На верхнем цилиндрическом участке полагаем, что температура постоянна и совпадает с температурой окружающей среды T_0 . В пределах конического участка поверхности происходит значительный нагрев заготовки, связанный с тем, что в этой зоне находится очаг деформации. На этом участке температура задается также постоянным значением T_1 . И, наконец, на нижнем цилиндрическом участке рабочей вставки примем линейный закон распределения температуры от температуры нагрева T_1 до значения $T_2 = \frac{T_1}{2}$. Температуру нагрева в очаге деформации можно найти при помощи связи выделяющейся тепловой энергией A_T и работой пластической деформации $A_{пл}$, которая устанавливается через коэффициент выхода тепла η_T . На основании экспериментальных данных установлено [1], что для конструкционных сталей $\eta_T = 0,75...0,85$. В результате оказывается, что заготовка нагревается в диапазоне $100^\circ \div 200^\circ\text{C}$.

Задача нахождения установившегося температурного поля в нагретой конструкции в рамках осесимметричной задачи эквивалентна проблеме минимизации функционала следующего вида:

$$I = \iint_S \left\{ \frac{K}{2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] \right\} r dS + \int_{L_3} \frac{\alpha}{2} [T^2(r, z) - 2T_\infty T(r, z)] r dL. \quad (1)$$

Вторая часть функционала в соотношении (1) учитывает конвективный теплообмен с внешней средой на наружных поверхностях матрицы, где α – коэффициент конвективного теплообмена, T_∞ – температура внешней среды, K – коэффициент теплопроводности материала. В качестве расчетных примем следующие значения указанных параметров: $\alpha = 50 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{C}}$, $T_\infty = 25^\circ\text{C}$, $K = 50 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{C}}$. Термоупругая задача решалась без учета механических поверхностных и объемных нагрузок. В этом случае задача сводилась к минимизации функционала:

$$II = \pi \iint_S [\sigma_r (\varepsilon_r - \alpha T) + \sigma_z (\varepsilon_z - \alpha T) + \sigma_\varphi (\varepsilon_\varphi - \alpha T) + \tau_{rz} \gamma_{rz}] r dr dz, \quad (2)$$

При численном анализе применялся метод конечных элементов. Конструкция разбивалась на четырехузловые косоугольные изопараметрические элементы с билинейной аппроксимацией температуры и перемещений. Между составными частями матрицы вводились слои специальных контактных элементов. Специальным образом подобранных механические и теплофизические характеристики материала слоев [2] позволили моделировать условия идеального теплового контакта и механический натяг (0,02 мм) между составными частями матрицы. Решение задач теплопроводности и термоупругости в трех вариантах и заготовки проведено с помощью конечно-элементного программного комплекса SPACE-T [3].

Геометрические характеристики модели матрицы были приняты следующими:

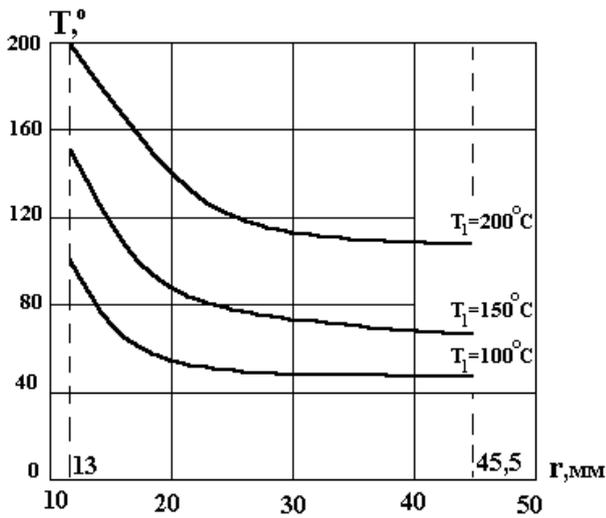


Рис.2. Зависимость температуры от радиальной координаты.

можно проверить справедливость утверждений об автоматическом выполнении условий идеального теплового контакта при построении конечно-элементной модели.

После решения задачи стационарной теплопроводности решалась задача термоупругости со всеми упрощениями, оговоренными ранее. Учет влияния неравномерного нагрева производился путем введения квазистатических узловых усилий. На рис. 3 представлен графики распределения интенсивности напряжений в нагретой (за счет тепла, выделяющегося при деформировании) матрице в радиальном направлении в сечении $z = h_1$, при различных температурных режимах

Максимальные значения интенсивность напряжений $\sigma_i = 0,712$ ГПа достигает в точках зон, прилегающих к поверхности рабочей вставки в очаге деформации, которая, как и следовало ожидать, является наиболее нагруженным элементом конструкции из-за наибольшего перепада температуры на ней. Следует отметить, что в

большой части конструкции уровень напряжений гораздо меньше чем в той части рабочей вставки, которая непосредственно контактирует с заготовкой.

В то же время известно, что от механического воздействия, которое является преобладающим для матриц, интенсивность напряжений достигает значений порядка 15 ГПа, т.е. воздействие тепловыделения при пластическом деформировании

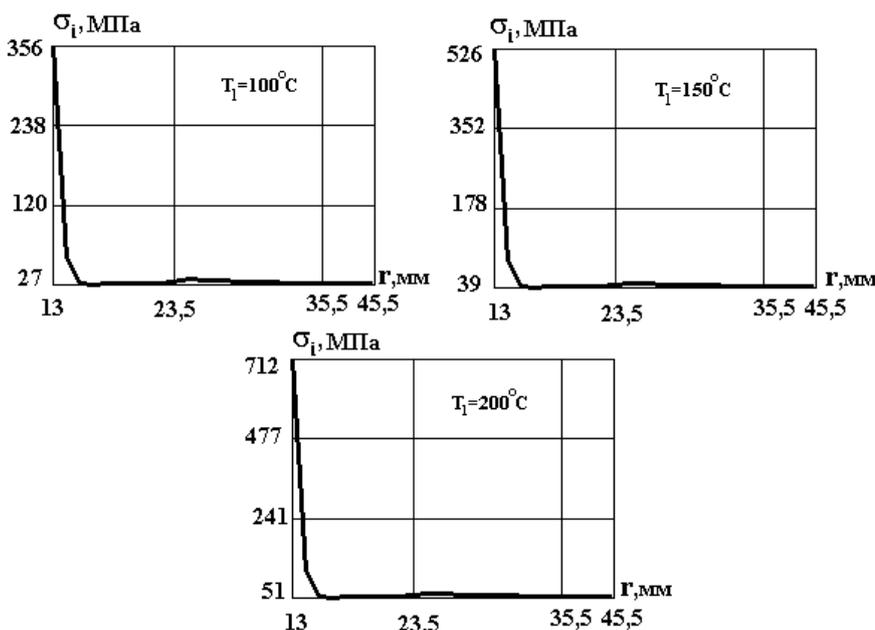


Рис.3. Распределение интенсивности напряжений σ_i в нагретой матрице.

заготовки является незначительным и им можно пренебречь в дальнейших практических расчетах, что значительно сократит время задания исходной информации.

Литература: 1. Евстратов В.А. Теория обработки металлов давлением. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1981. – 248с. 2. Конохов В.И., Лавинский Д.В. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».- Харків: НТУ «ХПІ».- 2003.- № 5.- С.93-98. 3. Бондарь С.В., Зубатый С.С., Киркач Б.Н., Лавинский В.И. Программный комплекс SPACE-T для решения термоупругопластических контактных задач // Динамика и прочность машин. – 2000. - №57, С. 24-34.

УДК 539.1

ОСОБЕННОСТИ ПРОЧНОСТНОГО РАСЧЕТА МАТРИЦЫ ИМПУЛЬСНОГО ПРЕССА ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Лавинский В.И., докт. техн. наук, **Лукьянов И.М.** (г. Харьков, Украина)

Work is devoted to exposition of basic approaches at estimations of capacity on the criteria of strength and inflexibility of matrix press for the compression of porous material.

В настоящее время во многих областях производства находят применение технологии, основанные на использовании пористых и порошковых материалов. Высокая стоимость сырья и большой ассортимент изделий делают актуальной задачу развития методов расчета и проектирования оборудования для уплотнения таких материалов. В современных высокопроизводительных технологиях широкое распространение получают импульсные прессы для уплотнения, выдавливания и брикетирования разнообразных пористых материалов.

Принцип действия таких установок основан на аккумулировании энергии и передаче ее в кинематическую энергию движения пуансона прессы. Наряду с развитием традиционных систем уплотнения пористого материала давлением начаты поисковые работы по созданию импульсных прессов с использованием энергии магнитного поля [1].

Главным конструктивным элементом импульсного прессы является матрица, в которой и происходит уплотнение пористого исходного материала. Предлагаемая

конструкция матрицы для уплотнения и брикетирования сырья (в форме параллелепипеда) в системе магнитно-импульсного прессы представляет собой массивную толстостенную плиту квадратную в плане с концентричным квадратным отверстием размером $L \times L$ и глубиной H , показанную на рис.1.

В процессе уплотнения и формирования брикета материала, некоторый объем которого изначально

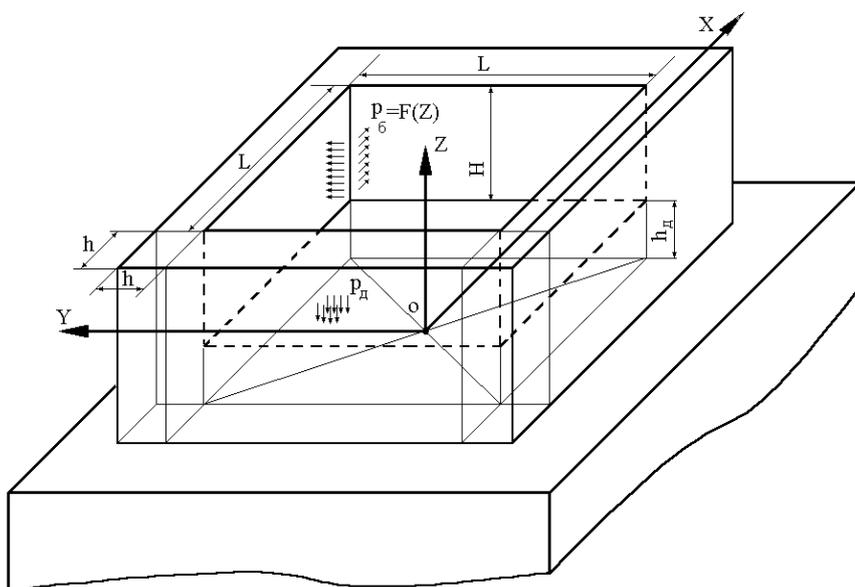


Рис.1. Расчетная схема матрицы.

помещается во внутреннюю полость, пуансон строго в вертикальном направлении (по оси Z) перемещается без зазора в полость матрицы и создает сжимающие нагрузки в этом объеме, которые при уплотнении приводят к возникновению контактных давлений на соответствующих поверхностях. Отметим, что конкретные законы распределения давлений по стенкам и днищу матрицы должны быть определены из решения задачи о процессе уплотнения пористого материала. Как показывает анализ процессов уплотнения [2], для некоторых материалов следует принимать двумерные законы распределения давления по соответствующим поверхностям.

В данной работе в начальном приближении принято, что по стенкам матрицы квазистатическое давление зависит только от координаты Z (кусочно-постоянная или линейная функции по высоте матрицы), а на днище действует постоянное давление. В более строгой постановке такая задача приводит к значительным трудностям.

Функционально матрица предназначена для создания условий гарантированно качественного уплотнения или формообразования брикета сырья. Поэтому при проектировании конструкции матрицы должны быть выполнены прочностные и жесткостные критерии, по которым возникающие нагрузки в технологическом процессе уплотнения не приводят к нарушению работоспособности.

При разработке прочностных критериев работоспособности в работе принят квазистатический процесс уплотнения материала, поэтому следует основываться на том факте, что учет особенностей многократного циклически действующего процесса следует ввести путем снижения коэффициента запаса прочности – n . Прочностной критерий работоспособности матрицы введен в виде неравенства для наибольшего расчетного напряжения [3]:

$$\sigma_{расч}^{max} \leq \frac{\sigma_m}{n} \quad (\sigma_m - \text{предел текучести материала матрицы}).$$

Еще ряд требований в проектировании конструкции матрицы заключается в выполнении технологических ограничений на искажение геометрических параметров внутренней полости в процессе многократного уплотнения и брикетирования. Возникновение достаточных по величине перемещений в точках стенок матрицы, приводящих к изменению геометрических размеров полости, может привести к заклиниванию пуансона в процессе уплотнения с последующим разрушением готового изделия при извлечении. Поэтому необходимо удовлетворить условие жесткости для наибольшего перемещения: $U_{max} \leq [U]$ ($[U]$ – допускаемое перемещение, величина которого назначается в соответствии с технологическими требованиями).

При оценках работоспособности матрицы по критериям прочности и жесткости основное заключается в расчетах напряженно-деформированного состояния (НДС) с последующим анализом указанных неравенств с целью выбора геометрической конфигурации и размеров матрицы. Параметры НДС в объеме материала матрицы определяются в рамках трехмерной постановки смешанной контактной задачи [4] при соответствующих граничных условиях.

В настоящее время наиболее используемым практическим приближенным методом решения задачи о НДС в телах сложной геометрической формы является метод конечных элементов. В данной работе анализ модели матрицы выполнен на основе авторского программного конечно-элементного комплекса SPACE-T (кафедра сопротивления материалов НТУ "ХПИ" [4]).

В соответствии с принятой расчетной схемой матрицы была выполнена серия

квазистатических расчетов с целью выбора ее конструктивных параметров, удовлетворяющих условиям прочностной и жесткостной работоспособности.

Законы распределения давлений в элементах выбирались на основании физического анализа процессов пластического уплотнения обобщенного пористого материала.

Новым элементом в решении смешанной контактной задачи в принятой постановке являлось использование нетрадиционного закона трения Прандтля [2] на контактных площадках. Рассчитанные компоненты тензора напряжений позволили вычислить значение интенсивности напряжений σ_i , по величине которого прогнозируем начало пластических деформаций в трехосном напряженном состоянии по теории пластичности Мизеса

Анализ деформированного состояния матрицы показал, что наибольшие перемещения возникают в боковых стенках в областях, удаленных от дна. Из характера распределения интенсивности напряжений в объеме матрицы были установлены зоны повышенных напряжений, которые располагаются в окрестности угловых областей матрицы – зонах концентрации напряжений.

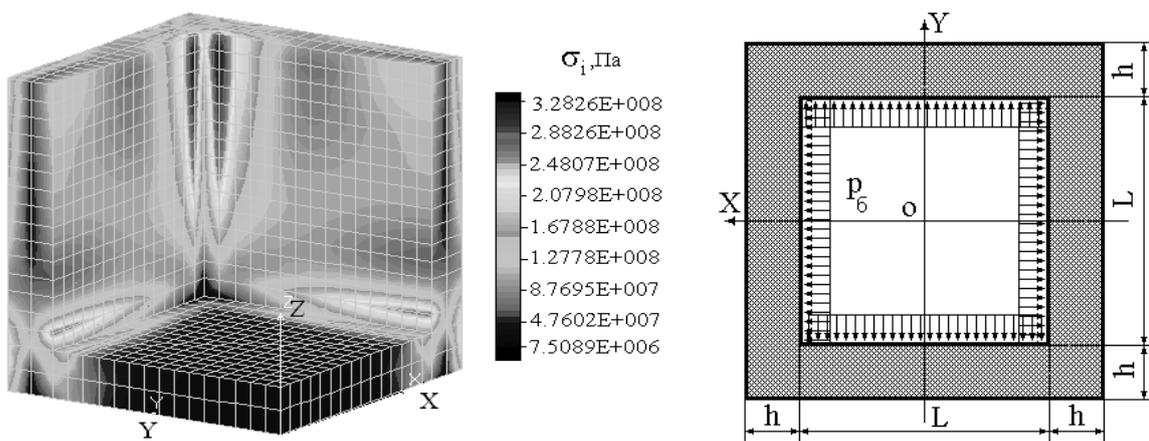


Рис.2.

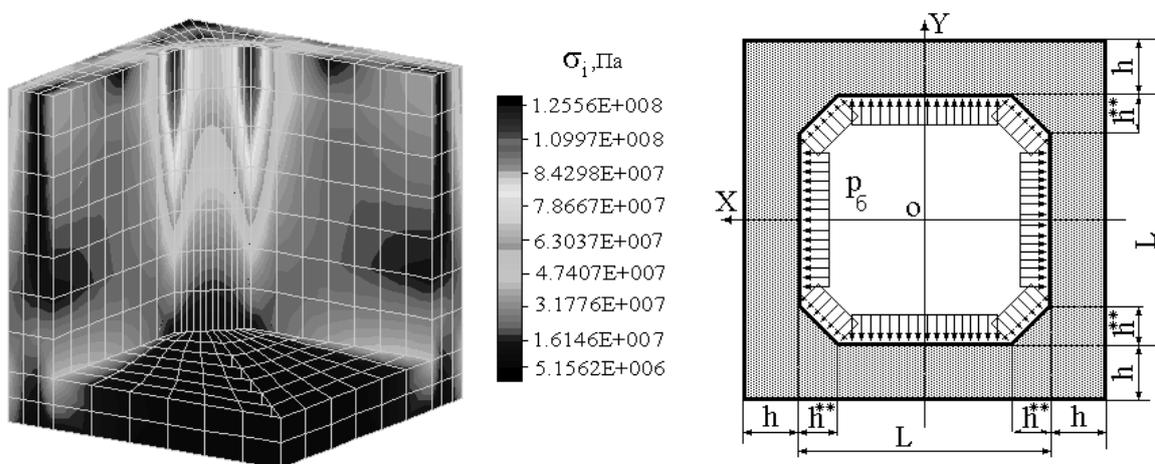


Рис.3

Проанализировано влияние толщины стенки матрицы на ее НДС при квазистатическом режиме уплотнения и брикетирования. С увеличением толщины стенки

происходит заметное снижение максимальных перемещений и интенсивностей напряжений в опасных зонах матрицы. Выяснено влияние формы внутренней полости на распределение интенсивности напряжений в матрице. На рис.2 приведено распределение σ_i в матрице при строго квадратной форме полости в плане. На приведенном рисунке ярко выражены зоны концентрации напряжений в вертикальных угловых зонах. На рис.3 показано распределение σ_i в матрице при квадратной форме полости в плане со скошенными углами. Сравнение распределений интенсивностей напряжений на этих рисунках показывает, что при заметном снижении уровня напряжений зоны концентрации стали менее выраженными. Наиболее отчетливо это заметно в нижних угловых зонах.

Детальный анализ параметров НДС позволил произвести выбор размеров при исполнении матрицы прессы, обеспечивающих выполнение работоспособность по критериям прочности и жесткости.

Литература: 1. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 1. Издание второе. -Харьков: изд. "МОСТ-Торнадо", -2003г. - 284с. 2. Друянов Б.А. Прикладная теория пластичности пористых тел. – М.: Машиностроение, - 1989г. -168с. 3. Феодосьев В.И. Сопrotивление материалов. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, -2001.- 591с. 4. Бондарь С.В., Зубатый С.С., Киркач Б.Н., Лавинский В.И. Программный комплекс SPACE-T для решения термоупругопластических контактных задач // Вестник ХГПУ. Динамика и прочность машин. – 2000. - вып. 57. - С. 24-34.

УДК621.923

РАЗРАБОТКА КЛАПАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Дудин А.Т. (г. Евпатория, Украина)

New designs of system of valves for the engine of internal combustion are offered.

В настоящее время на двигателях внутреннего сгорания применяются газораспределительные системы, состоящие из распределительных шестерен, распределительного вала, толкателей, штанг, коромысел с деталями крепления клапанов, пружин с деталями крепления и направляющих втулок. Ведущие зарубежные фирмы все больше выпускают автомобили с двигателями, имеющими два газораспределительных вала, например, автомобили “Нисан-Микра”, “Опель - Корса”. Основным недостатком газораспределительной системы, состоящей из газораспределительных валов, является то, что распределительный вал - очень сложное и дорогое изделие. Если изнасилась опорная шейка или кулачок, то распределительный вал заменяется новым. Причем, распределительный вал заменяется

только на такой же, и поэтому перевести двигатель на другой режим работы невозможно. Переход на работу с одного вала на два или с двух на один не предусмотрен.

Газораспределительный механизм очень сложен, содержит большое коли-

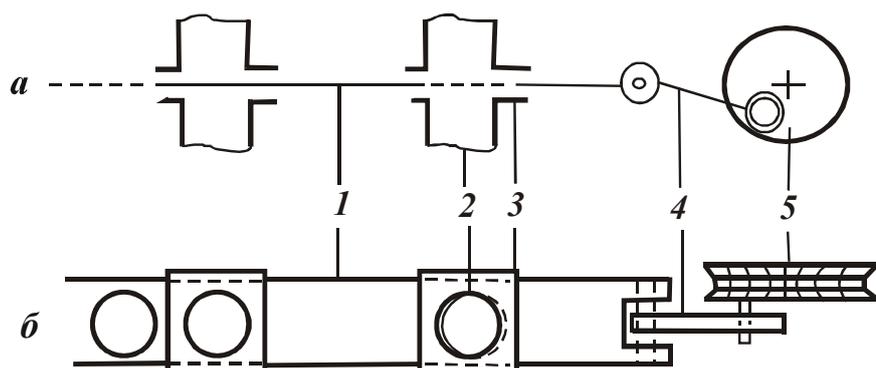


Рис. 1. Устройство и работа клапанной системы.

чество пружин, устройство для поворота клапанов, индивидуальную регулировку каждого клапана. Клапаны и сёдла в цилиндре требуют тщательной притирки. Газораспределительная система сложна в изготовлении, содержит большое количество деталей, сложна в эксплуатации и ремонте, то есть оказалась очень дорогой и металлоёмкой.

Можно ли расширить функциональные возможности газораспределительной системы, сделать ее более гибкой, перестраивать на другой цикл работы двигателя? Упростить конструктивно и технологически, сделать ее более простой в эксплуатации и дешёвой?

Поэтому нами предложено новое более простое техническое решение, исключая использование в системе распределительных валов, толкателей, штанг, коромысла, пружины, сёдел в цилиндрах и т.д. Вместо них в системе предлагается устанавливать пластину, ленту или вал с отверстиями, которые совершают возвратно-поступательное движение в направляющих, проходящих через подводящие и отводящие трубки из цилиндра двигателя. Пластина, вал, лента совершают возвратно-поступательное движение через шатун от специального коленчатого вала, который приводится в движение через шестерёнчатую передачу от основного коленчатого вала или зубчатый ремень, или цепную передачу, а в цилиндрах с оппозитными поршнями газораспределительная пластина или вал приводятся в движение сразу же подвижными штоками.

Рассмотрим схему устройства и работу клапанной системы. На рис. 1,а показан вид сбоку клапанной системы, а на рис. 1,б показан вид сверху: 1 – клапанная пластина; 2 – подводящие и отводящие трубы к цилиндру двигателя; 3 – направляющие для пластины (они сделаны такого размера, что не позволяют газу выходить наружу через отверстие в пластине); 4 – шатун; 5 – коленчатый вал со шкивом.

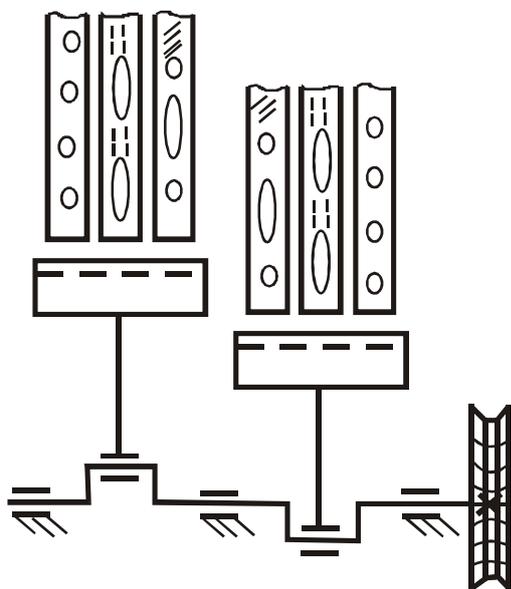


Рис. 2. Газораспределительный механизм.

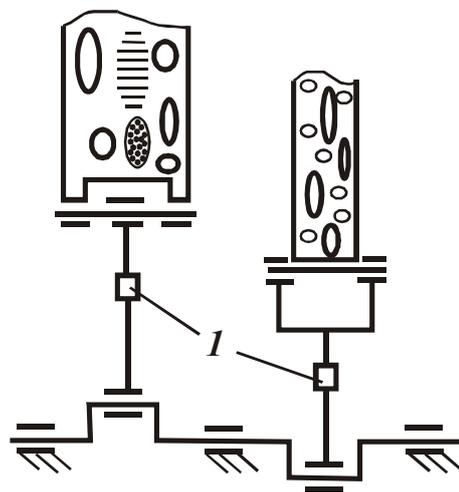


Рис. 3. Газораспределительный механизм.

На рис. 2 показан газораспределительный механизм, состоящий из трех отдельных пластин, а на рис. 3 – газораспределительный механизм, состоящий из одной пластины с несколькими рядами отверстий и возможностью регулировки длины шатуна: 1 – регулировочное устройство длины шатуна.

На рис. 4 показан двигатель с оппозитными поршнями и пластинчатыми

клапанами: 1 – передвижение пластин – клапанов подвижными штоками напрямую с возможностью регулировки.

Пластинчатые клапаны устанавливаются на любой двигатель внутреннего сгорания: однорядный, V-образный, с последовательно расположенными цилиндрами, оппозитивными поршнями и т.д., так как клапаны устанавливаются на трубопроводах и трубопроводах к цилиндру. Пластины приводятся в движение с одной или двух сторон, или с боковой стороны с нескольких точек. Пластина может иметь ребра жесткости, или в качестве пластины может работать вал круглой или эллипсной формы, квадратного или прямоугольного сечения с отверстиями или углублениями снаружи. Вместо клапанной пластины или вала применяется лента, которая изготавливается в виде пружинной ленты и сматывается одним концом, как рулетка. Тогда шатун только вытягивает ленту, а обратно она поступает за счет пружины, шатун перемещается в направляющих. На одном цилиндре газораспределительный механизм может состоять из одной, двух, трех и более пластин или одной пластины, но с одним или двумя, тремя и более рядами отверстий. Отверстия на клапанной пластине могут быть круглыми, эллипсными, но всегда соизмеримы с направляющими пластины на патрубке. Направляющие должны перекрывать отверстие полностью на всю длину, чтобы исключить выход газов через отверстие из цилиндра в атмосферу. Если необходимо открывать цилиндр на длительное время, а направляющие при этом короткие, следует использовать отверстия небольших размеров, но расположенных на небольшом удалении друг от друга, образующих, по сути, сито, или отверстия в виде щелей, образующих решетку, рис. 3.

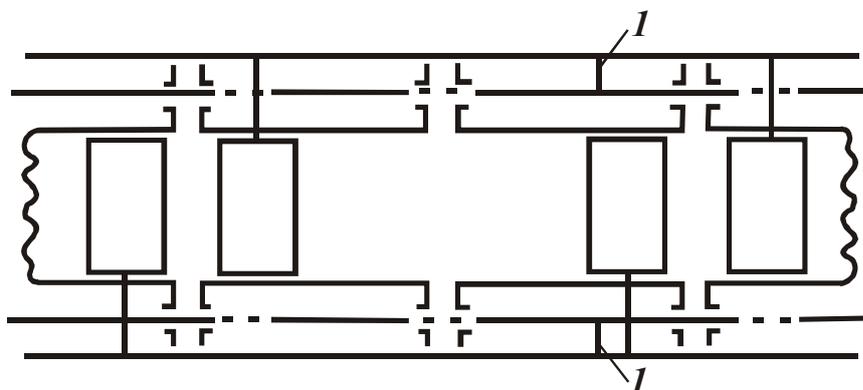


Рис. 4. Двигатель с оппозитивными поршнями и пластинчатыми клапанами.

Щелевые отверстия могут располагаться наклонно или продольно короткими отверстиями и рядами, рис. 2. Круглые, эллипсные и щелевые отверстия (расположенные перпендикулярно возвратно-поступательному движению пластины), а также мелкие отверстия, образующие сито, и отверстия другой формы могут чередоваться на пластине. Пластины приводятся в движение через шатун от шкива или шестерни с кривошипом, или коленчатый вал, а на двигателях с последовательно расположенными цилиндрами от подвижных штоков. Пластины газораспределительного механизма легко заменяются и могут иметь другой рисунок для перевода двигателя на другие рабочие тела и другие циклы работы.

Во время работы газораспределительного механизма при переходе на другой цикл работы достаточно исключить работу одного из рядов. Для этого перекрывается заслонка на подводящем трубопроводе и двигатель переводится на другой цикл работы, что не возможно выполнить на газораспределительных механизмах, состо-

ящих из распределительных валов. Заслонки на трубопроводах позволяют одну клапанную пластину использовать с огромным количеством вариантов работы, с разными циклами и разными рабочими телами, не прибегая к замене пластин. Кроме того, клапанные пластины с отверстиями могут иметь специальную зенковку с углублениями, с помощью которой отверстия закрываются крышечками, что способствует перенастройке работы двигателя на другой режим.

Патрубки трубопроводов от цилиндра до клапанов и далее могут иметь гибкие элементы и сдвигаться относительно пластины с фиксацией. Так как клапанные пластины устанавливаются на трубопроводах от цилиндра, то их конструктивно легче установить в наиболее оптимальном месте (дистанционно) с учетом объема двигателя, его назначения, оптимальных путей подвода и вывода газов и использования их для других целей, например, теплообмена.

Пластина совершает возвратно-поступательное движение от шатуна через специальный коленчатый вал или кривошип, расположенный на шкиве, или шестерне, или на подвижных штоках с выбором (регулировкой) места крепления. Специальный коленчатый вал приводится в движение от основного коленчатого вала через шестеренчатую (ременную, зубчатую, цепную) передачу.

Клапанная пластина проходит в направляющих через трубопроводы, отводящие и подводящие газ к цилиндрам двигателя. На трубопроводах могут размещаться заслонки, которые открываются и закрываются, вводя данный трубопровод в работу или закрывая его. Клапанные пластины меняются, на шатуне устанавливается регулировочное устройство, изменяющее его длину. Таким образом, предложенная клапанная система проще в устройстве, изготовлении и эксплуатации. Она позволяет получить технический результат, который нельзя получить на газораспределительной системе с распределительными валами, содержит меньше деталей, экономически выгодна.

Двигатель внутреннего сгорания с пьезоэлектрическими клапанами.

Двигатели внутреннего сгорания работают на горючем газе, дизельном топливе, бензине, керосине. В Канаде сделан двигатель, использующий в качестве топлива перекисное соединение бутилового спирта, подаваемое в потоке азота. Основными недостатками двигателей внутреннего сгорания являются: система охлаждения двигателя используется с низким коэффициентом полезного действия; рабочий ход используется только от сгорания рабочего тела; газораспределительная клапанная механическая система приводится в работу распределительными валами; поршни, изменяя направление движения, передают ударную нагрузку на пальцы и коленчатый вал.

Для расширения функциональных возможностей двигателя внутреннего сгорания нами предложено механическую клапанную систему, приводимую в работу распределительными валами, заменить на пьезоэлектрическую клапанную систему. Для этого в работу двигателя вводим новые рабочие тела, за счет которых получаем дополнительные рабочие хода двигателя. Отработанный газ вторично используем в рабочих цилиндрах двигателя. Вводя компенсирующую пружину за поршнем в цилиндр двигателя, исключаем передачу ударной нагрузки на пальцы и коленчатый вал. Механическую клапанную систему газораспределения заменяем на пьезоэлектрическую, которая работает от пьезоэлектрических датчиков, расположенных в цилиндре двигателя через усилитель – преобразователь сигналов или от компьютера, или совместно от датчиков и компьютера. Для этого сов-

мещаем два пьезокристалла, на один из которых подается отрицательный потенциал, а на другой – положительный потенциал. Кристалл, получивший отрицательный потенциал, сжимается, а кристалл, получивший положительный потенциал, расширяется. Затем потенциалы меняем на обратные. Это явление пьезокристаллов используется в полиграфии.

На рис. 5 приведены схемы работы пьезоэлектрических клапанов: а – принцип работы пьезокристаллических клапанов; б – расположение пьезокристаллических клапанов снаружи цилиндра; в – расположение пьезокристаллических клапанов внутри цилиндра (пьезокристаллы внутри цилиндра работают одновременно и как датчики, выполняя роль системы зажигания); г – принцип работы пьезокристаллов не плоскостью, а торцом (то есть образуя при этом трубу для выпуска газов); д – участие пьезоклапанов в открытии и закрытии цилиндра через шток и клапан. Пьезокристаллические клапаны работают от нейтрального положения, когда на пьезокристалл подается только один сигнал и когда на пьезокристаллах сигналы меняются на противоположные.

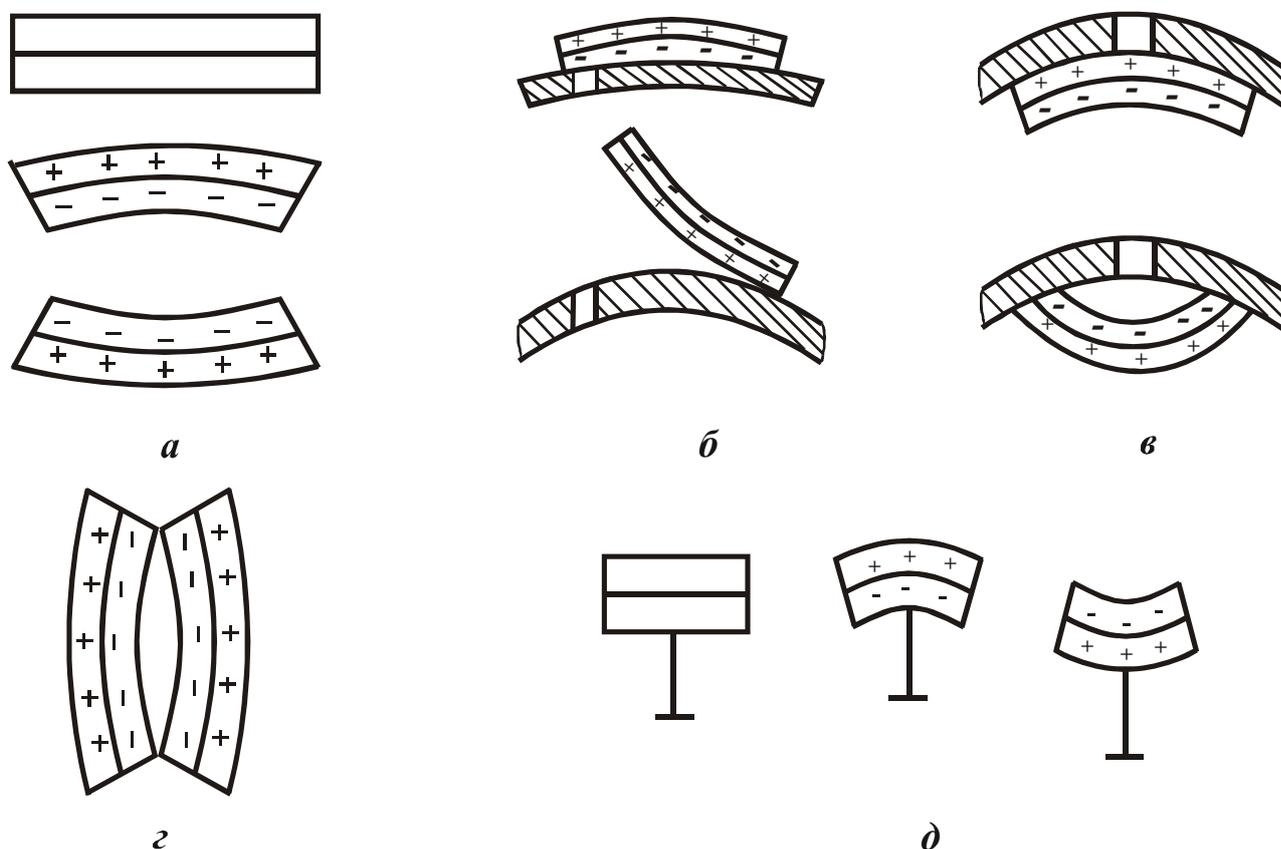


Рис. 5. Схемы работы пьезоэлектрических клапанов.

Пьезокристаллические клапаны позволяют управлять конструкцией двигателя и обеспечивают его работу в любом режиме и на любой цикл, применяя компьютер и пьезодатчики. Устанавливая на одном цилиндре от одного до пяти клапанов, можно добиться самого эффективного использования рабочих тел, реализуя оптимальную работу двигателя. Система пьезоэлектрических клапанов позволяет расширить применение рабочих тел в двигателе и отказаться от традиционных систем охлаждения, и наоборот, использовать систему нагрева цилиндров двигателя отработанными газами, для уменьшения расхода традиционных рабочих тел.

Двигатель внутреннего сгорания работает на любом из известных рабочих тел: горючем газе, бензине, керосине, дизтопливе, перекисном соединении бутилового спирта и других. Рассмотрим работу двигателя, состоящего из одного цилиндра. Его цикл работы:

1-й такт. Рабочий ход от сгорания рабочего тела, в конце рабочего хода открывается клапан и газ выпускается из цилиндра, нагнетается с помощью насоса в специальный теплоизолированный баллон. В рабочем цилиндре остается отработанный горячий газ с давлением, близким или равным атмосферному. Клапан закрывается, поршень находится в нижнем положении (НМТ), в цилиндр производится дозированный впрыск (хладоагента) сжиженного газа.

2-й такт. В цилиндре происходит вакуумирование, поршень под действием вакуумирования перемещается из нижней мертвой точки к верхней мертвой точки. При достижении атмосферного давления открывается впускной и выпускной клапаны, подается горячий газ из теплоизолированного баллона, а из выпускного клапана он выводится на подогрев цилиндра снаружи и через очистительные устройства - в атмосферу. В цилиндре газ нагревает цилиндр и поршень с внутренней стороны, после чего клапан закрывается.

Производится вторичный дозированный впрыск хладоагента и идет еще одно вакуумирование цилиндра, в конце которого впускной и выпускной клапаны открываются и из цилиндров происходит удаление газа на очистительное устройство и в атмосферу. Поршень приходит в крайнее верхнее положение и на этом второй такт заканчивается.

3-й такт. Впуск воздуха.

4-й такт. Сжатие – дозированный впрыск рабочего тела сгорания. Цикл повторяется.

Вариант второй. Цикл работы ДВС можно увеличить за счет еще дополнительного использования отработанных газов и введения двух тактов. Двигатель работает как в первом варианте, но после второго такта впускной и выпускной клапаны остаются открытыми на весь третий такт. Поршень перемещается из верхнего положения (ВМТ) к нижнему (НМТ), через цилиндр прогоняется отработанный газ, который, выйдя из цилиндра, обогревает цилиндр снаружи и подается на очистку в атмосферу. В конце третьего такта цилиндр закрывается и четвертый такт полностью повторяет второй такт, описанный в первом варианте. Третий и четвертый такт из варианта 1 становятся 5 и 6 тактами варианта 2. Рассмотрим цикл работы.

1-й такт. Рабочий ход – расширение от сгорания рабочего тела – выпуск – впрыск хладоагента.

2-й такт. Рабочий ход от вакуумирования – прогон по цилиндру горячих газов и прогрев цилиндра снаружи – впрыск хладоагента – рабочий ход от вакуумирования – выпуск.

3-й такт. Прогон горячего газа через цилиндр и снаружи – впрыск хладоагента.

4-й такт. Рабочий ход от вакуумирования – прогон по цилиндру горячих газов и прогрев цилиндра снаружи – впрыск хладоагента – рабочий ход от вакуумирования – выпуск.

5-й такт. Впуск воздуха.

6-й такт. Сжатие – впрыск рабочего тела сгорания. Цикл повторяется.

Многоцилиндровый двигатель работает со специальным баллоном и без него, подавая отработанный газ в другие цилиндры непосредственно из рабочего цилиндра.

дра. Для уменьшения ударных нагрузок на коленчатый вал и пальцы, в цилиндр двигателя вводим пружину, на которую поршень опирается, подходя к нижней мертвой точке, сжимает пружину, что уменьшает эллипсный износ цилиндра, ликвидирует нагрузку от окружной тяги шатуна, выравнивает поршень по отношению к цилиндру, уменьшает вибрацию двигателя во время работы, рис. 6.

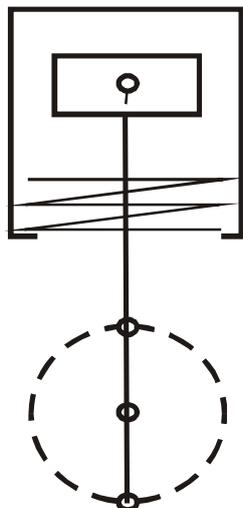


Рис. 6. Цилиндр с пружиной.

В вариантах 1 и 2 циклы заканчиваются тактом впуска воздуха и тактом сжатия. Так как в работе двигателя используется хладагент (сжиженный газ), то, пропуская через хладагент горючий газ и введя его в цилиндр двигателя в начале такта сжатия, получаем разряжение цилиндра, которое облегчает такт сжатия, а при оптимальном подборе температур и объёмов, достигается хорошее вакуумирование цилиндра, то есть дополнительный рабочий ход. При нагреве поступающего воздуха в цилиндр, надо учитывать потерю – на сколько будет меньше кислорода в цилиндре после сжатия и как это отразится на рабочем ходе. При определенных объёмах, температурах и разных рабочих телах возможен вариант нагрева подаваемого воздуха и ввод в цилиндр охлажденного рабочего тела. Сжиженный газ, применяемый для вакуумирования, называемый хладагентом, используется из специальных баллонов, и применяется как для обеспечения оптимальной работы двигателя, так и для охлаждения цилиндров снаружи. Двигатель может работать в режиме двигателя внутреннего сгорания без вакуумирования, собирая горячий газ в специальный баллон и переходить на работу от вакуумирования на рабочие хода, заполняя цилиндр горячим газом или охлаждая цилиндр снаружи. Этот вариант можно выполнять на отдельном цилиндре с отдельным приводом, используя горячий газ из рабочих цилиндров и хладагент.

Двигатель может работать с газораспределительной системой от распределительных валов. Пьезоэлектрическая газораспределительная система устанавливается на цилиндры и трубопроводы, работает на несколько рабочих тел, поэтому количество клапанов при обслуживании одного цилиндра может быть от 1 до 7 и более. Пьезоэлектрическая газовая система распределения совмещается с другими газораспределительными системами.

Пьезоэлектрические клапаны используются в качестве датчиков для обратной связи с компьютером для выбора оптимального режима работы. Кроме того, они используются в качестве системы зажигания. Введенные новшества и изобретенные элементы просты в устройстве и могут применяться на всех конструкциях известных двигателей внутреннего сгорания. С введением этих систем количество вариантов работы двигателей внутреннего сгорания существенно увеличивается. Все эти новшества позволяют упростить конструкцию двигателя, снизить его себестоимость, повысить КПД, экономнее расходовать горючее, продлить срок службы двигателя, уменьшить вес и количество трущихся и вращающихся деталей, повысить надежность, добавить рабочие хода при вакуумировании, повысить эффективность использования систем охлаждения, увеличить мощность двигателя.

Литература: 1. Дудин А.Т. Двигатель внутреннего сгорания (работающий на газообразном, жидком и твердом топливе) // Труды 9 Межд. научн.-техн. конф. Физические и компьютерные технологии. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2004 – С. 151–153.

О НОВОЙ КОНЦЕПЦИИ СОЗДАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ АНТИФРИКЦИОННЫХ ТРИБОСПРЯЖЕНИЙ

Гайдамака А.В., канд. техн. наук, Гапонов В.С., докт. техн. наук,
Музыкин Ю.Д., канд. техн. наук, Тернюк Н.Э., доктор техн. наук
(г. Харьков, Украина)

The article presents the new method of provision recours the machines caused by the trobiengineering of cultivation surface of details.

Опыт эксплуатации машин показывает, что примерно 80..90% их отказов происходит из-за износа узлов и деталей. Потери средств в машиностроении развитых государств вследствие износа и трения достигает 4..5% национального дохода. Такие ощутимые расходы обусловлены недооценкой значимости проблем повышения износостойкости и долговечности машин, как ныне эксплуатируемых и проектируемых, так и намеченных к выпуску на ближайшие годы [1].

Тем не менее в отечественной промышленности продолжают использоваться устаревшие хорошо известные и массового апробированные конструкционные и смазочные материалы, технологические процессы и оборудование, а совершенствование узлов трения машин и механизмов в значительной мере развивается путем, проторенным опытом зарубежных стран или посредством приобретения их лицензий, а также импортного оборудования. Указанные причины только закрепляют тенденцию хронического отставания качества техники, выпускаемой в Украине, в сравнении с аналогичными образцами ведущих зарубежных фирм. Изменить сложившуюся ситуацию в области надежности триботехнических систем отечественных машин и механизмов, повысить их конкурентоспособность на внутреннем и внешнем рынках и в дальнейшем превзойти лучшие аналоги зарубежной техники по основным технико-экономическим показателям возможно путем качественного совершенствования прежде всего подхода в обеспечении требуемого ресурса.

С учетом вышеизложенного, на кафедре «Детали машин и прикладная механика» НТУ «ХПИ» в сотрудничестве с ГП «Институт машин и систем» развернуты работы по применению новой триботехнологии – технологии адресного модифицирования рабочих участков поверхностей трения (АМТ-технология [2]) в производстве деталей кинематических узлов.

Предлагается, во-первых, на финишной стадии изготовления деталей узлов трения производить обработку поверхностей трения в смазочной среде со специальными экологически чистыми добавками (модификаторами). В результате саморегулирующихся физико-химических процессов в местах контакта деталей на поверхностях трения пара металл-металл заменяется парой металлокерамика-металлокерамика с повышенными износостойкостью, сопротивлением водородному растрескиванию и электрохимической коррозии. Во-вторых, окончательное формирование микрогеометрии поверхностей контакта деталей узлов трения осуществлять дополнительной обработкой указанными добавками (модификаторами) в смазочной среде после сборки машины в стартовый период ее эксплуатации.

Оптимизационные модели обработки узлов трения по АМТ-технологии включают в себя сведения о режимах техпроцессов, структуре модификаторов, свойствах материалов деталей, видах сопряжения, условиях эксплуатации [3]. Целевыми функциями оптимизации являются не параметры качества (шероховатость, микро-

твердость, напряжение, структура) [4], а триботехнические характеристики деталей, работающих в подвижных сопряжениях (коэффициент трения, интенсивность износа, ресурс, задиростойкость, время приработки). Это – принципиальные отличия триботехнологического подхода к формированию поверхностных слоев деталей узлов трения от известных технологий машиностроения. Параметры качества поверхностного слоя не в полной мере объясняют выходные эксплуатационные характеристики сопряжений, не всегда однозначно влияют на них, зависят от условий трения (скорости, давления, окружающей среды).

Применение АМТ-технологии апробируется на наиболее массовых и ответственных деталях: подшипниках качения, подшипниках скольжения, гильзах цилиндров. Разработаны и созданы лабораторно-промышленные устройства для модифицирования деталей узлов трения. Проверка эффективности АМТ-технологии осуществляется циклом лабораторных исследований на образцах и опытно-промышленными испытаниями натуральных узлов трения.

Литература: 1. Справочник по триботехнике / Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе, в 3 т. Т.1. Теоретические основы. – М.: Машиностроение, 1989.-400с. 2. Агафонов А.К., Гапонов В.С., Гайдамака А.В., Тернюк Н.Э. О новой экологически чистой технологии создания ресурсосберегающих трибосистем // Проблемы машиностроения.-2005.-№3(в печати). 3. Гайдамака А.В., Тернюк Н.Э. Моделирование этапов создания модифицированных поверхностей узлов трения // Вісник технологічного університету Поділля. Частина 1. Технічні науки. – 2002.-№6. с 81-84. 4. Рыжов Э.В., Суслов А.Г., Федоров В.П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. – М.: Машиностроение, 1979.-176с.

УДК 621.432

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДА ТУРБОНАДДУВА ДИЗЕЛЕЙ ТИПА 6ТД ПО ДИНАМИЧЕСКИМ НАГРУЗКАМ

Шатохин В.М., докт. техн. наук, проф., **Зайцев А.И.**, докт. фарм. наук, проф.,
Кутювая О.В., канд. техн. наук, (г. Харьков, Украина)

The method of a non-linear flexible coupling parameters synthesis as means of dangerous torsional oscillations lowering in power circuits of two-shaft transport diesel engines is offered. In its basis the cost-effective form of harmonic linearization method for the integral equations of motion recorded with the help of pulse-frequency characteristics lies. The number of equations is equal to the number of nonlinearities, therefore laboriousness of the task solution practically does not depend on number of model freedom degree.

Введение. Характерной особенностью турбопоршневых двигателей типа 6ТД является наличие существенно нелинейного привода к турбине и компрессору. Нелинейности порождаются установкой упругой муфты с предварительным натягом, ступенчатой рессоры, а также наличием зазоров, неизбежных в шлицевых и зубчатых соединениях. Указанные узлы вместе с фрикционными муфтами предназначены для снижения импульсивных инерционных нагрузок при изменении внешней нагрузки, резком нажатии на педаль газа на холостом ходу, переключении передач, торможении горным тормозом. Кроме того, параметры муфты и рессор подбираются таким образом, чтобы частоты возмущающих моментов двигателя превосходили частоты собственных колебаний привода. В процессе доводки дизелей в приводах, однако, были обнаружены интенсивные субгармонические колебания, неожиданные для конструкторов. Известные подходы по анализу динамических нагрузок в сило-

вых передачах машин с ДВС [1, 2] не позволяют объяснить природу указанных колебаний и тем более не содержат аппарата для их исследования.

В статье найден механизм возникновения опасных субгармонических колебаний, произведена сравнительная оценка различных вариантов привода к агрегатам турбонаддува с точки зрения уровня основных и субгармонических колебаний и соответствующих максимальных упругих моментов; обосновано применение в приводах дизелей податливой рессоры из специально обработанной стали с установкой и без установки упругой муфты. Приведены результаты экспериментальных исследований.

1. Модель привода для исследования субгармонических колебаний. На рис. 1 представлена кинематическая схема дизелей типа 6ТД с потребителями: 1 – впускной коленчатый вал; 2 – упругая муфта на впускном валу; 3 ÷ 7 – шестерни главной передачи; 8 – выпускной вал; 9 – рессора привода компрессора; 10 – упругая муфта в приводе компрессора; 11 – фрикционные муфты; 12 – ротор компрессора; 13 – рессора привода турбины; 14 – ротор турбины; 15 – резино-пальцевые муфты; 16 – потребители (гидротормоза).

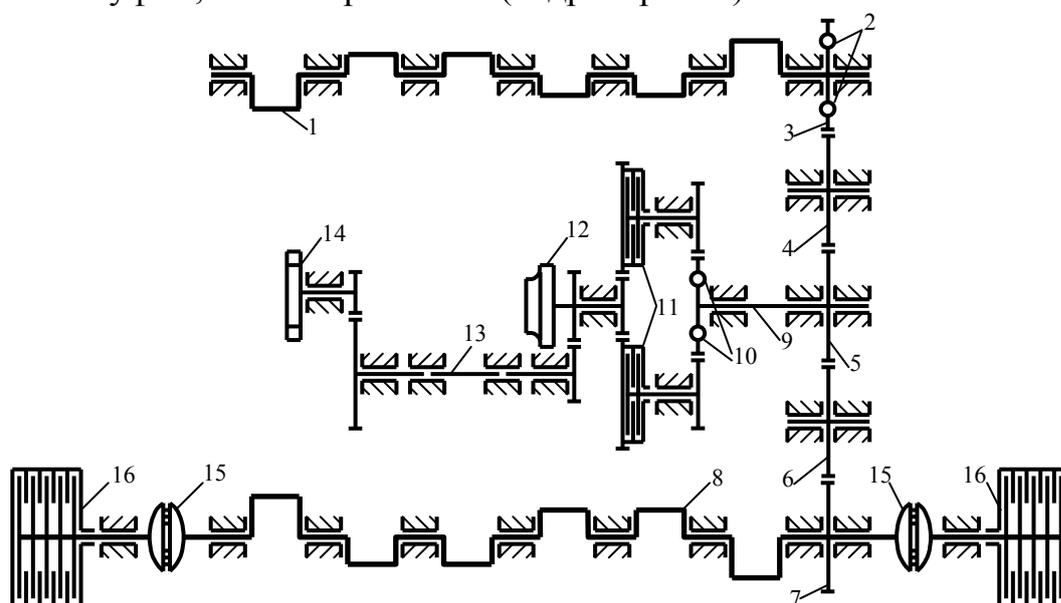


Рис. 1. Кинематическая схема двигателей типа 6ТД с потребителями.

Для механической модели привода исследовались три вида соединений с компрессором: упругая муфта (рис. 2), ступенчатая рессора (рис. 3), гладкая рессора. Соответствующие нелинейные упругие характеристики с учетом технологических зазоров показаны на рис. 4. Параметры нелинейных характеристик ввиду их существенного влияния на характер установившихся колебаний проверялись экспериментально. При этом одновременно оценивались демпфирующие свойства соединения.

Параметры нелинейных характеристик, приведенные к выпускному валу: 1 – $c'_{17} = 3,7 \cdot 10^4$ Нм; $c''_{17} = 1 \cdot 10^4$ Нм; $d'_{17} = 0,0029$ рад; $d''_{17} = 0,0353$ рад; 2 – $c'_{17} = 3,7 \cdot 10^4$ Нм; 3 – $c'_{17} = 2,08 \cdot 10^4$ Нм; $c''_{17} = 1,16 \cdot 10^5$ Нм; $d'_{17} = 0,03$ рад. Зазор в соединениях оценивался экспериментально, его значения для различных агрегатов лежат в достаточно широких пределах. Чтобы отразить это, исследования осуществлялись для следующих d_{17} : 0,004 рад; 0,008 рад; 0,02 рад. На разных режимах сред-

ний момент M_{cp} , передаваемый нелинейным соединением, также изменялся в широком диапазоне; расчеты производились для нескольких значений: 100 Нм; 200 Нм; 300 Нм; 400 Нм.

Механическая система валопровода рассматриваемого двигателя, включающая основные силовые передачи и приводы к вспомогательным механизмам, имеет большое число степеней свободы. Расчеты линеаризованной модели показали, что первые две собственные частоты определяются упруго-инерционными свойствами привода турбонаддува. Отношения частот вращения компрессора и турбины к частоте вращения коленчатого вала для двигателя 6ТД-2 имеют следующие значения: $n_k/n_{к.в.} = 12,459$; $n_m/n_{к.в.} = 9,099$, а их приведенные моменты инерции – $I_{18} = 1,801 \text{ кгм}^2$, $I_{19} = 2,078 \text{ кгм}^2$; приведенная жесткость участка между указанными массами – $c_{18} = 1,999 \cdot 10^4 \text{ Нм}$.

Возникновение субгармонических колебаний невозможно объяснить наличием гармоник шестого (главной) и кратных ей порядков в возмущающем моменте двигателя с номинальной регулировкой. Их причиной могут быть возмущения только значительно более низкой частоты. Это потребовало проведения специальных экспериментальных исследований. Анализ полученных в ходе экспериментов законов движения сечений валов, показал, что при неравномерной работе цилиндров в их разложении в ряд Фурье могут присутствовать все гармоники, начиная с первой, которая в рабочем диапазоне частоты вращения валов для привода к компрессору и турбине может быть резонирующей. Это обстоятельство и положено в основу проведенных исследований. В расчетах принималось, что колебания возбуждаются первой гармоникой, а ее амплитуда для сечения валопровода в месте установки рессоры компрессора бралась из эксперимента (кинематическое возбуждение). Большинство расчетов проводилось с амплитудой 0,01 рад. Величина ее может достигать и больших значений при возрастании разрегулировок цилиндров.

2. Математический аппарат исследования установившихся динамических процессов в нелинейных силовых передачах. Особенностью большинства моделей машинных агрегатов с ДВС является то, что число нелинейных элементов технологи-

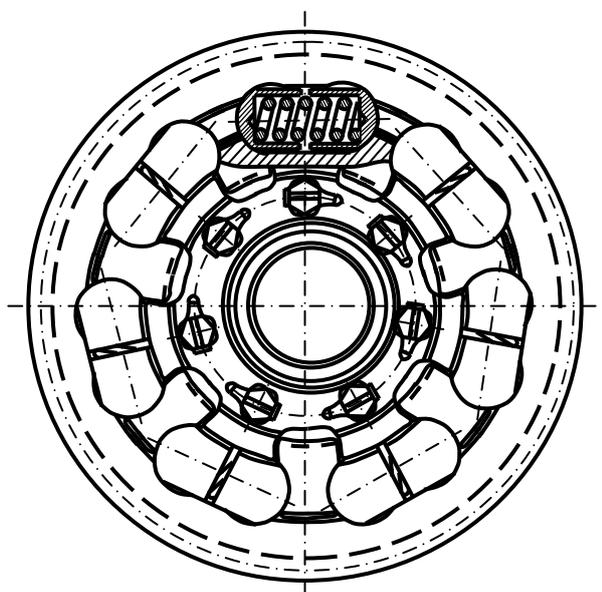


Рис. 2. Упругая муфта привода компрессора и турбины.

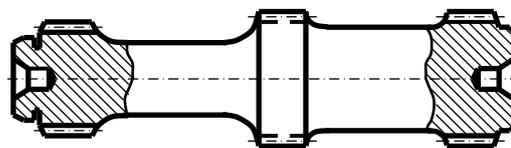


Рис. 3. Ступенчатая рессора.

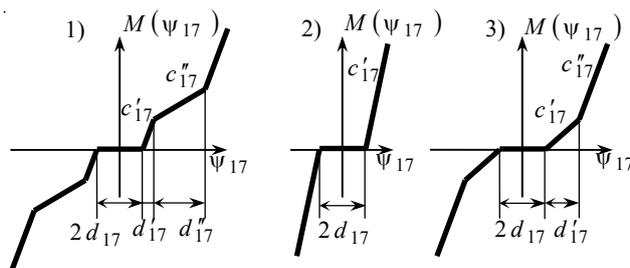


Рис. 4. Нелинейные характеристики: 1 – упругой муфты; 2 – гладкой рессоры; 3 – ступенчатой рессоры.

ческого и конструктивного характера в них существенно меньше числа степеней свободы. Известно, что в таких случаях при исследовании установившихся динамических процессов 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; $\Phi(t - \tau) = [\varphi_{i,j}(t - \tau)]$ ($i, j = \overline{1, s}$) – матрица ИЧХ; $f(y) = [f_1(y_1), f_2(y_2), \dots, f_s(y_s)]^m$ – 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 коэффициент в линеаризованном соединении; $g(t) = [g_1(t), g_2(t), \dots, g_s(t)]^m$ – 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].

$$y_{n+1}(t) = y_n(t) - z_n(t), \quad (2)$$

$$z_n(t) - \int_0^T \Phi(t - \tau) f'_y(y_n) z_n(\tau) d\tau = -l_n(t), \quad (3)$$

$$l_n(t) = \int_0^T \Phi(t - \tau) f(y_n) d\tau + g(t) - y_n(t) \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad (4)$$

где $f'_y = \text{diag}\{f'_{y_1}, f'_{y_2}, \dots, f'_{y_s}\}$ – диагональная матрица.

В работах [3, 4] изложены эффективные численные алгоритмы реализации формул (2) – (4).

3. Результаты расчетно-экспериментальных исследований субгармонических колебаний. Экспериментальные исследования были проведены с целью: оценки уровня кинематического возбуждения в приводе при различных условиях эксплуатации; определения параметров демпфирования; изучения поведения нелинейных систем на разных режимах установившихся вынужденных колебаний (основных и субгармонических); сопоставления с результатами расчетов амплитуд колебаний масс. В процессе исследований на стенде с гидротормозами регистрировались угловые скорости: носка коленчатого вала – шестерня 17; шестерен компрессора и тур-

бины, соответственно 12 и 14 (рис. 1). На рис. 5 приведен характерный образец осциллограммы с субгармоническим резонансом, записанной для привода с гладкой рессорой (нелинейность 2 на рис. 4) для частоты вращения вала двигателя $\omega = 298 \text{ c}^{-1}$.

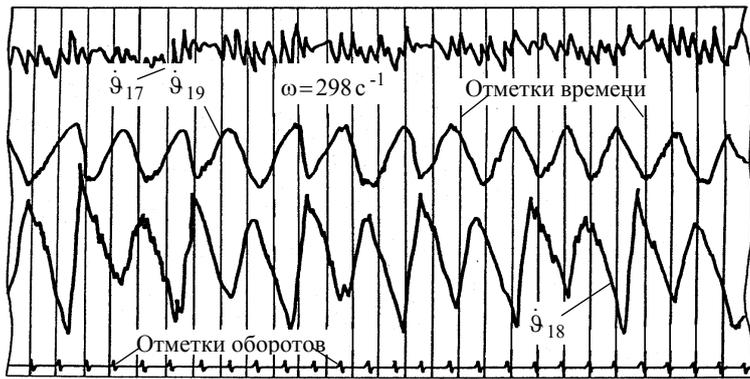


Рис. 5. Субгармонический резонанс в системе с нелинейностью 2.

При этом с целью изменения возбуждения производилась разрегулировка двигателя, для чего третий цилиндр отсоединялся от системы управления. Указанная запись получена при максимальной разрегулировке, соответствующей положению рейки топливного насоса этого цилиндра на подаче холостого хода и осуществлении остальными насосами максимальной подачи топлива.

Так как эксперименты показали, что на наиболее вероятных режимах работы двигателя возбуждаются устойчивые субгармонические колебания резонансного характера, для рассматриваемых моделей сначала были проведены расчеты свободных колебаний. Гипотеза о том, что субгармонические колебания можно рассматривать как свободные колебания консервативной нелинейной динамической модели, поддерживаемые кратными по частоте гармониками возмущающего воздействия подтверждается многочисленными исследованиями моделей рассматриваемого класса [5].

На рис. 6 для модели с нелинейностью 2 построены зависимости первых трех гармоник свободных колебаний от частоты (средний момент – 300 Нм): сплошная линия – первая гармоника; штриховая – вторая; штрих-пунктирная – третья. Кривые с номерами 1, 2, 3 получены при d_{17} : 0,02 рад; 0,008 рад; 0,004 рад. Исследовано влияние различных нелинейностей и некоторых других параметров на уровень высших гармоник свободных колебаний.

Хотя в расчетах основное внимание уделялось субгармоническим колебаниям, но учитывая их резонансный характер, для получения дополнительной информации рассчитывались также и основные резонансные колебания.

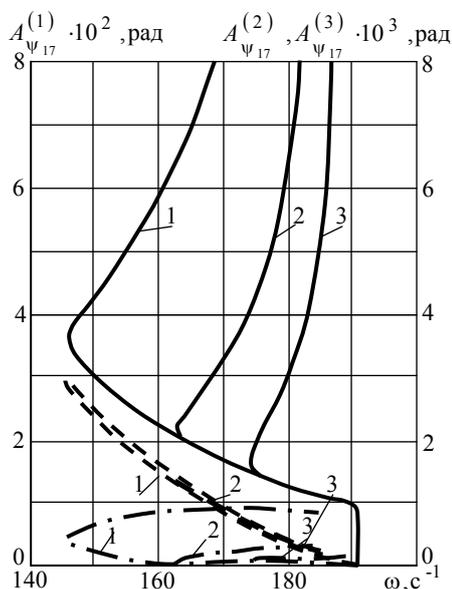


Рис. 6. Амплитуды гармоник для нелинейности 2.

Результаты расчетов основных и субгармонических колебаний в системе с нелинейной характеристикой 2 для угла закручивания нелинейного соединения представлены на рис. 7, 8. На первом построена зависимость амплитуды первой гармоники вынужденных колебаний $A_{\psi_{17}}^{(1)}$ от частоты. Наиболее сильная из высших гармоник – вторая, составляет менее 10% от первой. На рисунке показана также полученная выше зависимость амплитуды первой гармоники свободных колебаний от частоты, которая на рис. 8, где приведены зависимости субгармонической составляющей $A_{\psi_{17}}^{(1/2)}$ и основной гармоники субгармонических колебаний от частоты, перестроена для удвоенных значений частот. Аналогичные исследования субгармониче-

ских колебаний проведены для моделей с нелинейностями 1 и 3. Полученные результаты подтверждают исходную гипотезу о близости субгармонических и свободных колебаний. Установлено, что при одинаковых зазорах наибольшие колебания и максимальные упругие моменты развиваются в системе с нелинейностью 3. Уровни максимальных основных и субгармонических колебаний для нелинейностей 1 и 2 близки, но соответствующие им упругие моменты для нелинейности 1 меньше. Отметим, однако, что если для нелинейности 2 указанные колебания можно устранить за счет уменьшения технологических зазоров, то для нелинейностей 1 и 3, как показали расчеты свободных колебаний, этого может оказаться недостаточно.

Результаты проведенных исследований вместе с данными расчетно-экспериментальных исследований переходных режимов (пуски, переключение передач, наброс и сброс нагрузки и т.д.) оказались одними из наиболее убедительных аргументов по отказу от использования в приводе турбонаддува 6ТД-2 упругой муфты и переходу на применение податливой рессоры диаметром 27 мм (вместо 29 мм). Заготовки для рессоры получают из стали 45ХН2МФА-Ш методом экструзии. Повышение твердости рессоры до HRC=51÷56 увеличивает не только ее надежность, но и надежность всего привода. Применение этой рессоры в приводе двигателя 6ТД-1 с упругой муфтой повышает общую его податливость, что приводит к снижению оборотов, на которых происходят наиболее интенсивные колебания. Благодаря этому снижаются также и максимальные нагрузки.

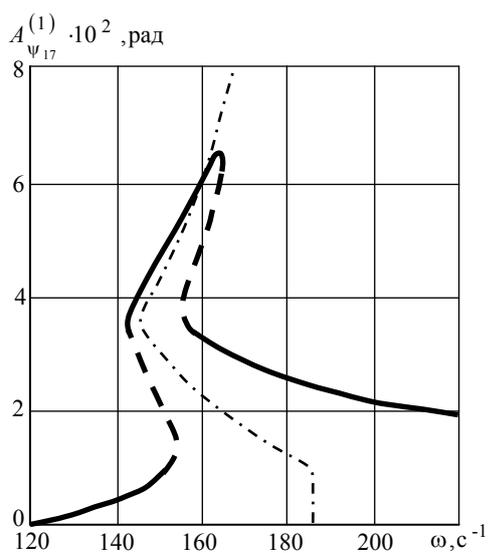


Рис. 7. Основной резонанс для нелинейности 2.

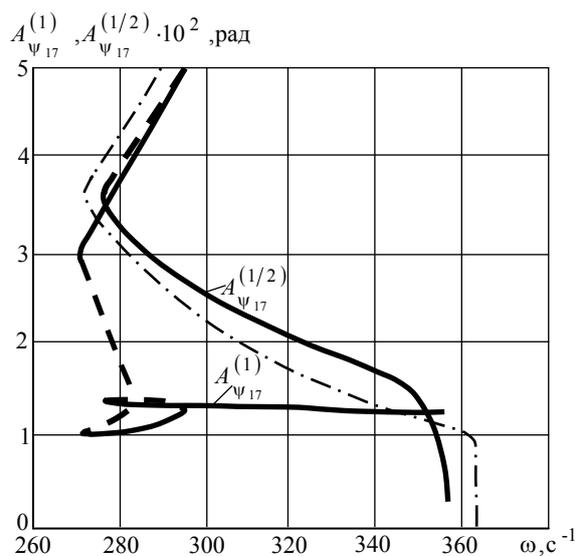


Рис. 8. Субгармонический резонанс для нелинейности 2.

Выводы. 1. По уровню амплитуд второй гармоники свободных колебаний неблагоприятной является модель с нелинейность 3 (ступенчатая рессора). 2. Наименьшие динамические нагрузки развиваются в моделях с нелинейностями 1 (упругая муфта) и 2 (гладкая рессора). 3. Привод с гладкой рессорой является предпочтительным благодаря возможности уменьшения технологических зазоров. 4. Наилучшие результаты для привода дизеля 6ТД-2 дает использование податливой рессоры диаметром 27 мм. 5. Предложенная методология имеет значительные перспективы для исследований по снижению динамических нагрузок в нелинейных моделях силовых передач.

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. 5. Шатохин В.М. Об особенностях субгармонических резонансов в силовой цепи двухвального транспортного дизеля // Динамика и прочность машин.– Харьков: Вища школа.– 1990.– Вып. 52.– С. 51-56.

УДК 621.822.5

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОКЛИНОВЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ С САМОУСТАНОВЛИВАЮЩИМИСЯ ВКЛАДЫШАМИ

Гапонов В.С., доктор техн. наук, **Столбовой А.С.**, канд. техн. наук,
Музыкин Ю.Д., канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)

Results of investigations are presented and recommendations on choice of geometrics of bearings with selfplaced inserts, which allow to raise reliability of bearer being designed are given.

Радиальные подшипники скольжения с самоустанавливающимися вкладышами находят широкое применение в энергетическом машиностроении благодаря высоким стабилизирующим свойствам, позволяющим преодолевать неустойчивость движения, связанную с автоколебаниями, и способности компенсировать перекосы валов, возникающих при монтаже и во время эксплуатации. Конструктивная реализация рассматриваемых типов подшипников определяется условиями, в которых эти опоры будут эксплуатироваться [1]. Расчеты рабочих характеристик: несущей способности, потерь на трение, расходов смазки и рабочих температур основываются на решениях уравнений, описывающих законы сохранения импульса (второй закон Ньютона), сохранения массы и сохранения энергии [2,3]. Важнейшим условием повышения надежности работы подшипников является выбор оптимальных форм рабочих поверхностей, обеспечивающих максимальную несущую способность при возможно меньших потерях на трение и минимальном нагреве.

При проектировании гидродинамических подшипников скольжения существенное значение имеет выбор оптимального отношения ширины подшипника к диаметру вала. Возможность самоустановки опорных поверхностей снижает опасность возникновения кромочного эффекта, а ограничением для подшипников общего машиностроения служит требование уменьшения осевых размеров. В этих опорах с ростом относительной ширины опорных поверхностей в пределах $0,6 \div 1,5$ возрастает грузоподъемность, определяемая минимально допустимой толщиной смазочного слоя, и увеличиваются потери от сил трения. В гидравлических турбинах, где диаметры валов выбираются из стандартного ряда [1] в пределах от 800 мм до 2300 мм при увеличении размеров валов остаются жесткие ограничения на монтажные зазоры, что связано с требованиями на биение ротора. Увеличение ширины подшипника в этом случае приводит к чрезмерному росту температур и максимальных гидродинамических давлений на опорных поверхностях. Ограничения по температурам и давлению определяют в большинстве случаев для рассматриваемого диапазона предельную грузоподъемность. Основываясь на выполненных расчетах, можно рекомендовать для диаметра вала 950 мм диапазон относительных осевых габаритов

в пределах $0,21 \div 0,47$.

С увеличением диаметра до 1800 мм оптимальный диапазон снижается до пределов $0,17 \div 0,28$, а при диаметрах до 2800 мм он лежит в пределах $0,15 \div 0,21$.

Выбор осевого габарита выдвигает задачу определения оптимальной длины опорной поверхности в направлении вращения и числа опорных сегментов с учетом переноса тепла и прокачки смазки в межсегментном пространстве.

Исследование подшипников с диаметром вала 1200 мм и осевыми габаритами $300 \div 780$ мм показали, что наибольшая несущая способность и минимальный коэффициент трения получается при отношении ширины сегмента к его длине в пределах $1,2 \div 1,6$. Снижение этой пропорции до 1 и увеличение до 2 оказывает незначительное влияние на несущую способность и потери от трения. Увеличение числа опорных сегментов также способствует снижению температуры подшипника. В тех случаях, когда несущая способность лимитируется минимальной толщиной смазочного слоя, рациональное отношение ширины и длины опорной поверхности лежит в пределах $1 \div 1,3$.

Работоспособность подшипников во многом определяется выбором относительного зазора. В общем случае малые радиальные зазоры могут приводить к высоким температурам, уменьшению минимальных толщин смазочного слоя и возрастанию потерь от сил трения. В различных отраслях машиностроения в зависимости от материалов вкладышей и внешних эксплуатационных факторов относительный радиальный зазор может изменяться в пределах $(0,4 \div 4) \cdot 10^{-3}$. В опорах гидравлических турбин для диаметров валов $800 \div 1180$ мм рекомендуется принимать установочный зазор δ_0 в пределах $0,15 \div 0,20$ мм, а при увеличении диаметров до 2300 мм - $0,20 \div 0,25$ мм. Заметное влияние на надежность работы радиальных подшипников с самоустанавливающимися сегментами оказывает кривизна рабочих поверхностей, определяемая разницей радиусов поверхностей сегментов и вала - δ . Постоянные граничные условия всегда соблюдаются при наличии конфузورных зазоров между валом и сегментами. При некоторых соотношениях δ/δ_0 на отдельных участках рабочих поверхностей могут появиться диффузорные зазоры, что приведет к нарушению потока смазки и изменению границы несущего слоя. На разгруженных сегментах наличие диффузорных зазоров со стороны входных кромок может привести к опрокидыванию опорного сегмента, что нежелательно. Условия сохранения конфузорного зазора для разгруженных и нагруженных сегментов рассмотрены в работе [4]. Если работоспособность опоры определяется условием перехода к граничному трению, то для получения максимальной несущей способности следует приближать радиус рабочей поверхности к радиусу вала.

Исследование зависимостей рабочих характеристик подшипника от угла установки опоры качания показывает, что для различных кривизн рабочих поверхностей существует оптимальный диапазон расположения опоры. Приближение точки опоры к середине сегмента приводит к росту общего эксцентриситета, сближению рабочих поверхностей и росту температуры, а смещение в сторону выходной кромки раскрывает конфузорный зазор, увеличивает расходы смазывающей жидкости, и снижает потери от сил трения с одновременным уменьшением несущей способности и коэффициента трения.

Центральное положение точки опоры при принятых допущениях теоретически

не обеспечивает устойчивой работы самоустанавливающегося сегмента. Температурные и силовые деформации, имеющие место в работающих опорах, увеличивают радиус кривизны рабочих поверхностей, что влияет на несущую способность подшипника за счет создаваемого конфузорного участка. Общая грузоподъемность опоры получается ниже, а температура выше. В крупногабаритных опорах гидравлических турбин рекомендуется смещать опорное ребро приблизительно на 10% от длины хорды сегмента в направлении вращения.

Исследования влияния направления действия нагрузки показали, что поворот центра вала относительно расположения сегментов влияет на несущую способность опоры, определяемую минимальной толщиной смазочного слоя, и жесткость опорного узла. При направлении нагрузки между сегментами нагрузочная способность возрастает с одновременным увеличением смещения центра вала и снижением жесткости опорного узла. С увеличением числа сегментов этот эффект сглаживается.

Исследование рекомендаций по выбору оптимальных геометрических и эксплуатационных параметров позволяет повысить надежность проектируемых опорных узлов.

Литература: 1. ОСТ 108.129.16 – 82. Подшипники направляющие на масляной смазке для вертикальных гидравлических турбин. Конструкция, размеры и технические требования. Введ. 01.01.83.– Л.: РИО НПО ЦКТИ.– 1982.– 31 с. 2. Воскресенский В.А., Дьяков В.И., Зиле А.З. Расчет и проектирование опор жидкостного трения: Справочник. – М.: Машиностроение.– 1983. – 232 с. 3. ОСТ 108.023.110-86. Метод расчета сегментных подшипников на масляной смазке для валов гидравлических турбин. Введ.01.01.87.– М.: Минэнергомаш.– 1986. – 24 с. 4. Столбовой А.С. Расчет опорного гидродинамического подшипника скольжения с самоустанавливающимися сегментами. Тр. 7-й международной научно-техн.конф. «Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве». Х.: ХНПК «ФЭД» - 2003. – с. 236-239.

УДК 62.762

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАБОТУ ТОРЦОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ КОЛЕСНЫХ РЕДУКТОРОВ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

**Музыкин Ю.Д., канд. техн. наук, Гайдамака А.В., канд. техн. наук,
Столбовой А.С., канд.техн. наук (г. Харьков, Украина)**

The influence of temperature effect on deformation performances of a pair of abrasion of face seal wheel reduction gear of mobile machines is shown. The numerical results of magnitude of disclosing of the junction of a pair of abrasion are obtained.

Как было показано [1, 2], использование торцовых уплотнений в колесных редукторах мобильных машин взамен резиновых манжет для вращающихся валов по ГОСТ 8752-79 является эффективным, так как не только существенно повышает герметичность уплотнительного узла, но и приводит к росту надежности и долговечности работы подшипника, защищая его от попадания в него пыли, грязи, воды и других абразивосодержащих сред. Особенностью конструкции предлагаемого торцового уплотнения является тот факт, что в качестве вращающегося кольца пары трения используется непосредственно внутреннее кольцо радиально-упорного подшипника, которое, в силу особенностей его установки, испытывает минимальные воздействия силовых и температурных деформаций. Поэтому силовые и температурные нагрузки вызывают преимущественно деформацию только подвижного в осевом направлении кольца пары трения.

Эффективная работа уплотнительного узла в условиях эксплуатации колесных редукторов будет обеспечена лишь в том случае, если полная деформация в паре трения торцового уплотнения не будет превышать номинального размера находящихся в герметизируемой среде абразивных частиц, основная фракция которых лежит в пределах 10...25 мкм. Так как силовая и температурная деформации являются независимыми друг от друга параметрами, то есть выполняется принцип суперпозиции, полная деформация в зазоре пары трения соответствует их алгебраической сумме. Упругие деформации зависят, прежде всего, от продольного модуля упругости материала и линейных размеров кольца, а деформации, вызванные нагревом, зависят от коэффициентов теплопроводности и линейного расширения, а также градиента температуры, как в осевом, так и в радиальном направлениях.

Для предложенной конструкции торцового уплотнения с заданными линейными размерами подвижного в осевом направлении кольца пары трения [2] было показано, что упругая деформация, вызванная силовым воздействием от давления герметизируемой среды не превышает 1,2 мкм, что при реальных размерах абразивных частиц не приводит к отрицательным результатам.

Максимальное значение температурной деформации может быть получено, если предположить, что все тепло, выделяющееся в паре трения торцового уплотнения, отводится через подвижное в осевом направлении кольцо пары трения. Такое допущение, с одной стороны, упрощает практическое нахождение максимального значения температурной деформации, а с другой – исключает ошибки, связанные с перераспределением теплового потока по всем элементам торцового уплотнения.

Количество тепла, выделяющееся в паре трения торцового уплотнения [3]

$$W = PfVF, \quad (1)$$

где P – контактное давление; f - коэффициент трения; V - средняя скорость скольжения; F - площадь поверхности контакта.

Теплота трения, выделяющаяся в уплотнительном зазоре, передается первоначально в осевом направлении, а затем тепловой поток принимает радиальное направление, которое определяется положением теплового приемника, который для торцовых уплотнений находится у внутреннего либо наружного диаметра пары трения. Тогда тепловой поток, отводимый за счет теплопроводности в осевом и радиальном направлениях, равен

$$W_L = \lambda F \Delta T / \ell, \quad (2)$$

где λ - коэффициент теплопроводности; ΔT - перепад температуры; ℓ - толщина стенки в зоне перепада температур.

Решая совместно уравнения (1) и (2), определяем температуру в зоне контакта торцового уплотнения

$$T = \frac{P f V \ell}{C \lambda} + t, \quad (3)$$

где C – коэффициент пропорциональности; t - температура герметизируемой жидкости.

Температурная нагрузка вызывает деформацию уплотнительного кольца и приводит к нарушению плоскости контактных поверхностей пары трения. В результате возникает опасность раскрытия уплотнительного стыка, возможность перегрева и повышенного износа пары трения за счет проникновения в зазор абразивных частиц.

При осесимметричной деформации перемещение поперечного сечения представляют в виде поворота сечения на угол φ относительно нейтральной точки, напряжение в которой равно нулю. Для кольца прямоугольной формы, когда распределение температуры в сечении не зависит от радиуса, а в осевом направлении изменяется по линейному закону, угол поворота [3]

$$\varphi = \frac{\alpha \Delta T (d_2 - d_1)}{4l \ln(d_2/d_1)}, \quad (4)$$

где α - температурный коэффициент линейного расширения; d_1 и d_2 - соответственно внутренний и наружный диаметр кольца.

Линейная величина деформации, которая приводит к раскрытию стыка пары трения за счет перемещения наружной кромки пояска относительно внутренней

$$\Delta = 0,5\varphi(d_2 - d_1). \quad (5)$$

Полное раскрытие стыка пары трения равно сумме деформаций, полученных кольцом от силового и температурного воздействия. Для предложенной конструкции торцового уплотнения [1], используемого в колесных редукторах мобильных машин с геометрическими размерами подвижного в осевом направлении кольца пары трения [2], изготовленного из бронзы Бр. ОСН 10-2-3 при герметизируемом давлении 0,5 МПа, угловой скорости $90 \frac{1}{\text{с}}$ и температуре герметизируемой среды 30°C , согласно уравнения (3) температура в зоне контакта составит 47°C . Принимая линейный закон изменения температуры по длине кольца и используя уравнение (4), определяем угол поворота сечения относительно нейтральной точки $\varphi = 5,16 \cdot 10^{-4}$ рад. Для заданного угла поворота согласно уравнения (5), максимальная величина линейной деформации, вызывающая раскрытие стыка пара трения, составит $\Delta = 1,9 \text{ мкм}$.

Представленный результат расчета качественно правильно описывает картину температурных деформаций, однако дает завышенные результаты, так как не учитывает всего многообразия факторов, влияющих на коэффициент теплопроводности. Поэтому полученные результаты расчета являются вполне удовлетворительными для оценки возможности проникновения абразивных частиц в зону пары трения торцового уплотнения.

С учетом силовой деформации, которая составляет 1,2 мкм, максимальное суммарное раскрытие стыка пары трения составит 3,1 мкм, что для указанного гранулометрического состава абразивных частиц, содержащихся в герметизируемой жидкости, является вполне допустимым. Таким образом, использование торцовых уплотнений для герметизации внутренних полостей колесных редукторов мобильных машин является перспективным и может быть рекомендовано взамен используемых в настоящее время тандемов резиновых манжет.

Литература: 1. Музыкин Ю.Д., Залевский Р.А. «Применение торцовых уплотнений для герметизации подшипниковых узлов червячных редукторов». Труды 5 международной н/т конференции «Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве», Харьков, 2002, стр. 614-618. 2. Музыкин Ю.Д., Зубарь А.А. «Использование торцовых уплотнений в колесных редукторах мобильных машин». Труды 9 международной н/т конференции «Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве», Харьков, 2004, стр. 143-145. 3. Голубев А.И., Кондаков Л.А. и др. «Уплотнения и уплотнительная техника. Справочник», М., Машиностроение, 1986, 463 с.

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА РЕЕСТРА ПАРКА ПОРТАЛЬНЫХ КРАНОВ МОРСКОЙ ОТРАСЛИ

Андрієнко А.О. (г. Одесса, Україна)

The structure and functions of information analytical system « Portal cranes of Ukraine » for monitoring the branch Program of updating and development of park of portal cranes of seaports in system of the Ministry for transport and communication of Ukraine is resulted.

Назначение информационно-аналитической системы (далее «система») – анализ процессов модернизации и обновления перегрузочных комплексов с крановой схемой грузовых работ в морских портах, формирование управленческих решений обеспечивающих рост грузооборота морской отрасли до 2010 года не менее чем на 30%.

В состав Пользователей системы (рис. 1) включены:

- Государственное объединение «Укрморпорт», Министерство транспорта и связи Украины;
- Госнадзорохрантруда Украины с территориальными управлениями;
- морские порты Украины;
- предприятия работающие в системе отрасли;
- другие Пользователи сети интернет (с учетом уровня доступа).

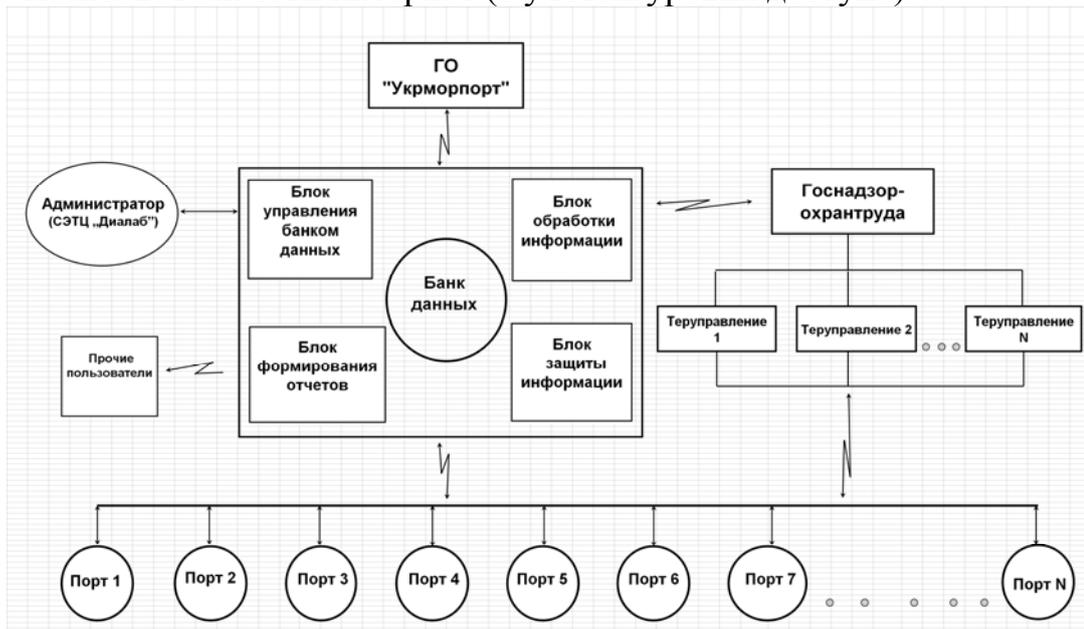


Рис. 1. Структура информационно-аналитической системы.

Установлены четыре уровня доступа (рис. 2) Пользователей к информационным ресурсам системы.

«Уровень доступа – 1» имеет право на неограниченный доступ ко всем информационным ресурсам системы без возможности их непосредственной корректировки. Доступ по паролю. (ГО «Укрморпорт», Министерство транспорта и связи Украины, департамент Госнадзорохрантруда).

«Уровень доступа – 2» имеет право на неограниченный доступ ко всем информационным ресурсам системы, которые касаются данного Пользователя (предприятия) без возможности их непосредственной корректировки. Имеет ограниченный доступ к остальным ресурсам системы. Доступ по паролю. (Морские порты Украи-

ны, территориальные управления Госнадзорхрантруда).

«Уровень доступа – 3» имеет право на доступ к отдельным информационным ресурсам системы без возможности их корректировки. Доступ по паролю. (Предприятия работающие в отрасли, информация о которых не содержится в базе данных системы).

«Уровень доступа – 4» имеет право на ограниченный доступ к отдельным информационным ресурсам системы (рекламные материалы) без возможности их корректировки. Доступ без пароля. (Любые пользователи Интернет).

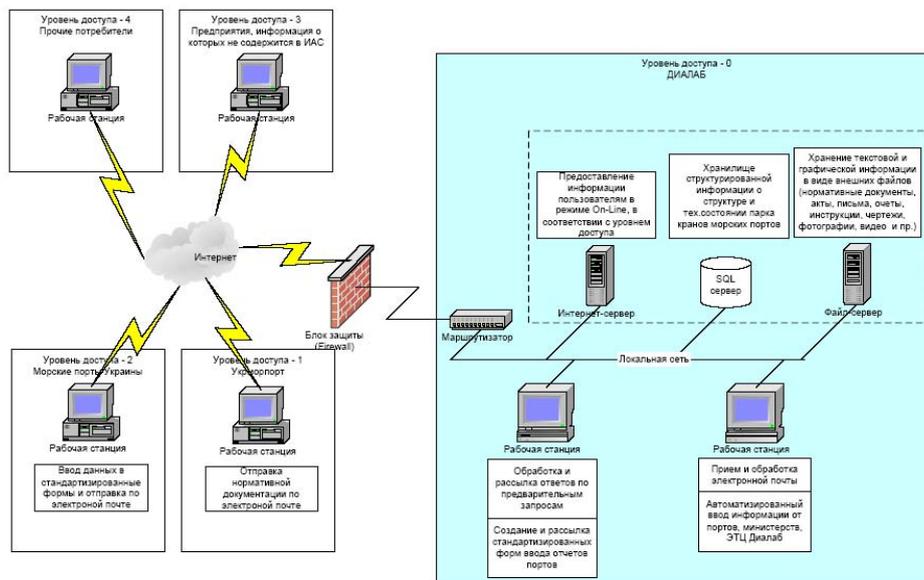


Рис. 2. Архитектура и уровни доступа к ресурсам информационно-аналитической системы.

Обновление информационной базы данных системы проводится на основании входных квартальных отчетов Пользователей (морских портов). Шаблоны входных отчетов генерируются и рассылаются администратором системы.

Заполненные шаблоны в установленный срок Пользователи пересылают Администратору. Информация входных отчетов автоматически помещается в общую базу данных системы.

Связь «Администратор → Пользователь → Администратор» при рассылке и получении шаблонов входных форм производится через электронную почту.

Формирование выходных отчетов реализуется системой для каждого конкретного Пользователя индивидуально, в соответствии с его правами доступа к информации.

Возможны два варианта получения выходных отчетов:

- on-line. Пользователь может, используя веб браузер, после авторизации по паролю, подключиться и получать стандартно-формируемые отчеты практически без задержки. Скорость доступа - от нескольких мс до нескольких минут;
- off-line. Пользователь отправляет Администратору системы запрос на формирование отчета по интересующей информации. Администратор формирует отчет и помещает на сайте. Скорость доступа – от нескольких минут до суток (в зависимости от сложности формирования отчета).

Достоинства информационно-аналитической системы: централизованное хранение данных; поддержание информации в актуальном состоянии, (дискретность обновления не более одного квартала); доступность информации различным катего-

риям Пользователей в соответствии с правами доступа; высокая безопасность системы от несанкционированного доступа извне; отказоустойчивость системы к аппаратным сбоям; масштабируемость; быстрое развертывание системы у конечных Пользователей; использование ныне существующего парка компьютеров без необходимости дополнительных затрат на специальное программное обеспечение.

Информационно-аналитическая система «Портальные краны Украины» работает в системе Министерства транспорта и связи Украины и Госнадзорохрантруда Украины с 2003 года по следующим направлениям:

- сбор, накопление, классификация, обработка, контроль и хранение информации о структуре и техническом состоянии парка портальных кранов морских портов отрасли;
- контроль затрат на ремонты, модернизации и реконструкцию, приобретение новых кранов;
- контроль эксплуатационных показателей кранов (коэффициента использования, коэффициента готовности, производительность и т.д.);
- предоставление портам текущей информации о нормативных документах, приказах, распоряжениях центральных органов управления;
- динамика изменения технического состояния кранов, прогноз отказов, аварий и др.;
- оценка и прогнозирование остаточного ресурса парка портальных кранов с учетом грузопереработки и технического состояния кранов;
- оценка экономических показателей работы различных типов портовых кранов с учетом интенсивной и экстенсивной эксплуатации кранов.

Литература: 1. Microsoft Windows XP. Home Edition и Professional. Русские версии. BHV-Санкт-Петербург, 2004. -532 с. 2. Microsoft Windows 2000 Server. Учебный курс MCSA/MCSE. Русская редакция, Москва, 2003. – 650 с. 3. My SQL. Справочник по языку. Издательство «Вильямс», 2005. – 432 с. 4. Гайфуллин Б.Н., Сгибнев В.Я., Туманов В.Е. «Введение в SQL для баз данных в архитектуре клиент-сервер», Москва, 2003. – 400 с. 5. Гринченко Н.Н. и др. «Проектирование баз данных СУБД Microsoft Access». Учебное пособие для вузов, издательство «Горячая линия-Теком», 2004. – 240 с.

УДК 539. 3.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЯХ ПОРТОВЫХ КРАНОВ НА ПРИМЕРЕ КОЗЛОВОГО ПЕРЕГРУЖАТЕЛЯ «ЭДЕРЕР»

Нестеров Е. А. (г. Одесса, Украина).

Modelling of operational pressure and movings in metal designs of port cranes

При эксплуатации козлового перегружателя "Эдерер", в течение 8 лет (расчетный срок эксплуатации 25 лет) имело место интенсивное трещинообразование, усталостное разрушение, локальная потеря устойчивости расчетных металлоконструкций.

С целью определения причин преждевременного разрушения металла проведен комплекс экспериментальных измерений и аналитических исследований с использованием современного программного комплекса ROBOT MILLENIUM (Франция) с конечно-элементным анализом напряжений и перемещений в металлоконструкции крана в свободном и нагруженном состояниях.

Исходные данные для расчета и анализа (размеры элементов, толщины, кон-

структивные особенности) получены из фирменных рабочих чертежей крана. Данные по грузоподъемности крана, режиму работы, рабочим скоростям механизмов получены из паспорта крана.

Марка материала элементов металлоконструкции - Сталь 16Мп (производства «Эдерер» Инкорпорейтед, Сиэтл, США) получена из паспорта крана. Механические свойства, химический состав основного металла (Сталь 16Мп) и сварочных материалов получен из протоколов лабораторных испытаний.

При проведении исследований выполнялись задачи по определению максимальных напряжений и упругих перемещений, возникающих в элементах металлоконструкции крана в опасных сечениях для 5-ти положений грузовой тележки (рис. 1) с максимальным грузом; динамических составляющих при пуске/торможении механизмов передвижения крана и грузовой тележки и возможного перекоса моста; характеристик крана (грузоподъемность, рабочие скорости, ускорения), при которых напряжения и перемещения находятся в допустимых пределах.

В результате расчета (рассмотрен вариант для позиции 1-тележка в конце консоли моста жесткой опоры, рис. 2) установлено, что максимальные напряжения в балке моста составляют 235,17 МПа (табл. 1) при отсутствии перекоса крана и при перемещении с грузом 40 т для варианта «Ускорение 1,4 м/с²», что превышает допускаемые $[\sigma]$ на 31,8% (данный вариант ускорения 1,4 м/с² грузовой тележки и крана рассмотрен при условии, что численное значение ускорения эквивалентно коэффициентам горизонтальных инерционных нагрузок, возникающих при работе крана, см. табл. III.2.5, [1]). Максимальные напряжения в жесткой колонне 222,37 МПа превышают допускаемые на 23,2%, максимальные напряжения в шарнирной колонне и в оголовках колонн - в области допустимых значений (табл. 1).

Таблица 1

Напряжение в основных элементах, МПа

	Позиция 1	Ускорение 1,4 м/с ²		%
		разгон	торможение	
Балка	178,31	143,9	235,17	31.8
Колонна жесткая	180,46	222,37	162,55	23.2
Оголовок жесткий	62,62	75,66	85,96	-37
Колонна шарнирная	60,53	82,93	41,68	-37
Оголовок шарнирный	67,22	84,59	56,98	-26

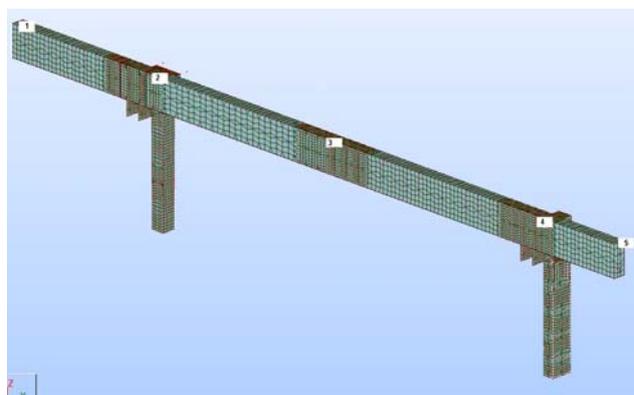


Рис. 1.

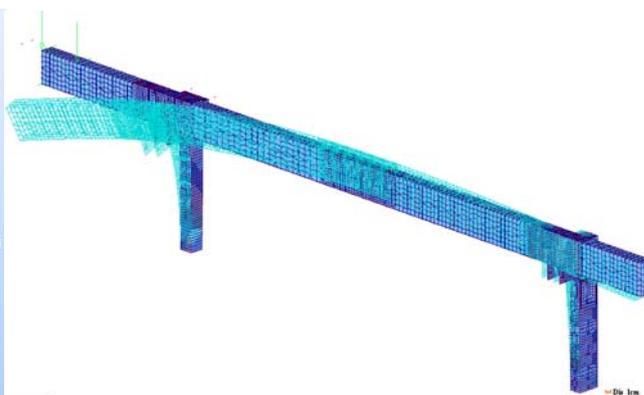


Рис. 2.

Допускаемые напряжения для материала металлоконструкции крана: $[\sigma] = \frac{\sigma_T}{n}$,

где σ_T - предел текучести материала металлоконструкции; σ_T - 282 МПа (данные протокола лабораторных испытаний); n - коэффициент запаса прочности; $n = 1,4$ (табл. I.3.4 [1]); $[\sigma] = 201,4$ МПа.

Максимальное перемещение (прогиб) консоли жесткой опоры составляет 123,6 мм, перемещения остальных точек моста крана представлены в таблице 2. Предельно допустимые прогибы мостов козловых кранов по ГОСТ 25546 – 82 (см. табл. III 2.2[1]) для тяжелого режима работы составляют: для центра пролета $L/1000$; для консолей $L/350$.

Числовое значение предельно допустимого прогиба консоли жесткой опоры для данного крана:

$18300/350 = 52,3$ мм. Максимальное перемещение (прогиб) консоли моста превышает допустимое в 2,4 раза.

Таблица 2

Перемещения расчетных точек крана, см

	Точка 1			Точка 2			Точка 3			Точка 4			Точка 5		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Собственный вес	0,35	-4,99	-1,29	0,44	-5,09	-2,21	0,29	-4,15	-4,75	0	-2,16	-0,99	0,02	-1,24	1,13
Позиция 1	-2,26	-8,68	-11,07	-1,88	-5,57	-2,27	-1,31	-1,65	1,7	-1,22	-0,3	-0,11	-1,23	-0,63	-1,19
С.вес + Позиция 1	-1,92	-13,7	-12,36	-1,45	-10,66	-4,49	-1,01	-5,8	-3,04	-1,23	-2,46	-1,1	-1,2	-1,88	-0,06
Разгон Позиция 1	-1,49	-23,5	-14,44	-1,12	-15,6	-6,17	-0,77	-9,16	-4,1	-0,96	-3,79	-1,57	-0,94	-2,5	-0,33
Торможение Позиция 1	-2,35	-3,9	-10,27	-1,77	-5,72	-2,81	-1,26	-2,45	-2	-1,5	-1,12	-0,63	-1,46	-1,25	0,21

В результате исследований выявлено, что необходимо установить систему синхронизации работы механизмов передвижения крана, чтобы избежать возникновения запредельных напряжений в металлоконструкциях оголовков колонн от перекоса балки моста (рис. 3).

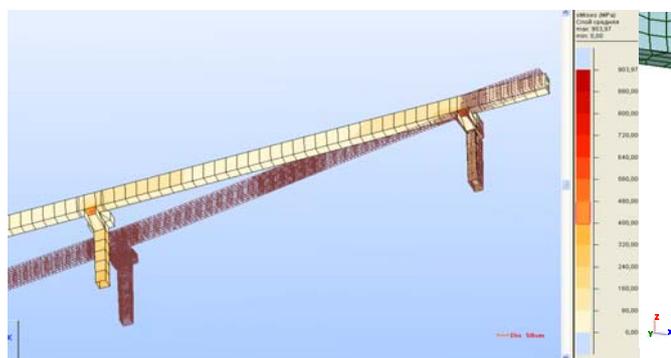


Рис. 3.

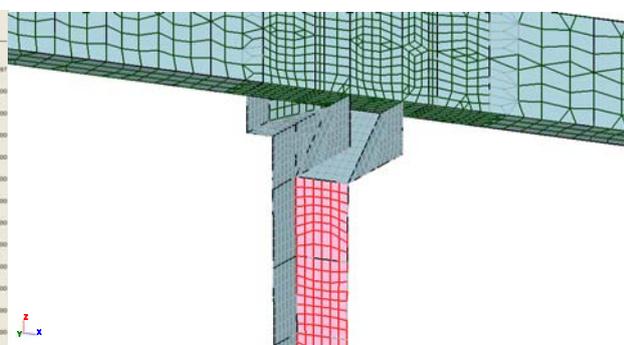


Рис. 4.

Деформации колонн крана находятся в упругой области нагружения металла, остаточными пластическими деформациями не являются и вызваны нецентральным приложением нагрузки от собственного веса моста (рис. 4).

Максимальные перемещения (прогибы) моста превышают допустимые в 1,3 ÷

2,4 раза, в результате чего образовались недопустимые дефекты коробки моста.

С целью продления срока эксплуатации перегружателя необходимо выполнить реконструкцию балки моста по специально разработанному проекту.

Литература: 1. Справочник по кранам: В 2 т. Т 1. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций / В. И. Брауде, М.М. Гохберг, И. Е. Звягин и др.; Под общ. ред. М. М. Гохберга. – М.: Машиностроение, 1988. – 536 с.: ил. 2. Анурьев В. И. А 73 Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х т. Т. 1. -5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1978. -728с., ил. 3. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия (Дополнения. Разд. 10. Прогобы и перемещения) / Госстрой СССР. -М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. -8с.

УДК 539.3

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РАСЧЕТНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ПОРТОВЫХ КРАНОВ

Семенов П.А. (г. Одесса, Украина)

The analysis and synthesis of methods of diagnosing of settlement metal designs of port cranes.

Выбор методов и средств неразрушающего контроля определяется характером предполагаемых дефектов, дефектоскопической технологичностью контролируемых объектов, разрешающей способностью метода, производительностью контроля, выявляемостью дефектов, приведенными затратами. Дефекты металлоконструкций, с точки зрения выбора метода контроля, можно классифицировать по группам: внутренние скрытые дефекты; поверхностные и подповерхностные дефекты; коррозионный износ; нарушение структуры металла.

Коэффициент дефектоскопической технологичности (f_1) устанавливает степень применимости или усложнения технологии дефектоскопического контроля с учетом конструктивных особенностей контролируемого объекта. Например, при $f_1=1,0$ условия контроля приближаются к лабораторным, при $f_1=0$ технология контроля неприменима. Промежуточные значения характеризуют степень усложнения технологии дефектоскопического контроля.

Крановые металлоконструкции обладают низким коэффициентом дефектоскопической технологичности $f_1=0...0,7$, в связи с неудобствами и опасностью контроля на высоте, большими габаритами конструкций, влиянием климатических факторов, необходимостью применения только портативных приборов, наличием труднодоступных областей контроля.

Технико-экономическая целесообразность выбора метода контроля определяется приведенными эксплуатационными и капитальными затратами на единицу продукции или серию изделий:

$$Z_i = (f_1, f_2)^{-1} S_i + E_n K_i$$

где $S_i=S_1+S_2+S_3+S_4$ - себестоимость контроля; S_1, S_2 - стоимость амортизации оборудования и его ремонта, соответственно; S_3 - зарплата персонала; S_4 - затраты на обеспечение безопасности; f_1 - коэффициент дефектоскопической технологичности; f_2 - коэффициент выявляемости дефекта (при выявляемости 100% $f_2 = 1$; 50% $f_2 = 0,5$ и т.д.); K_i - удельные капитальные затраты; E_n - нормативный коэффициент отчислений.

В результате исследований установлена сравнительная эффективность различных методов контроля качества металлоконструкций (табл. 1) с учетом трудоемко-

сти и производительности контроля, разрешающей способности метода, выявляемости и ориентации дефектов.

Таблица 1

Сравнительная эффективность методов неразрушающего контроля

Метод контроля	Минимальная глубина трещины, мм	Минимальное раскрытие берегов трещины, мм	Производительность способа, относительные единицы	Трудоемкость способа, относительные единицы	Выявляемость дефектов сварки				Ориентация дефекта
					трещины	неметаллические включения	раковины	непровары-	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ультразвуковой	0,1	0,001	1-2	10	10	45	85	95	Произвольная
Электромагнитный	0,1	0,001	4-5	5	100	-	-	-	То же
Рентгеновский на пленку	2% толщины изделия	0,1	0,1	30	2	100	100	65	При совпадении направления пучка с плоскостью трещины
Рентгенотелевизионный	3% толщины изделия	0,1	1-2	10	2	95	95	45	То же
Магнитный	0,01	0,001	2-3	8	98	-	-	-	Произвольная
Капиллярный	0,02	0,001	0,1	15	100	-	-	-	То же
Визуальный	-	0,1	20-50	1	50	-	-	-	То же
Визуально-оптический: - обнаружение дефекта - анализ дефекта	-	0,1	10-20	3	80-90	-	-	-	То же
	-	0,02	5-10	5	100	-	-	-	
Акустико-эмиссионный	-	-	50-100	1	100	-	-	-	То же
Инфракрасной эмиссии	-	-	50-100	1	100	100	100	100	То же

Эффективность применяемых методов оценивается по пятибалльной системе. При оценке в пять баллов применение метода следует считать наиболее эффективным. При четырех и трех баллах метод может применяться при отсутствии других, более совершенных методов. Два и один баллы свидетельствуют о низкой эффективности или о нецелесообразности применения метода для контроля выбранного объекта.

Оценка экономических показателей различных методов по капитальным и эксплуатационным затратам, позволяет определять технико-экономическую целесообразность применения метода для металлоконструкций и деталей машин с учетом характера выявленных дефектов.

Литература: 1. Клюев В.В. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник. В 2 т. – М.: Машиностроение, 1976. – Т. 1. 391 с. – Т. 2. 326 с. 2. Пустовой В.Н. Диагностирование металлоконструкций портовых перегрузочных машин. – М.: Транспорт, 1987. - 175 с. 3. Пустовой В.Н. Диагностирование портовых перегрузочных машин. Методы и средства контроля качества. – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1986. - 40 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЛИЧЕСТВА ВОДОПОДВОДЯЩИХ КАНАЛОВ И КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПОЛНЕНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ

Свиргун О.А. (г. Харьков, Украина)

The article consider estimate of influence some construction characters on working characters of rubber sliding bearing which to have water lubrication.

Одним из важных направлений дальнейшего развития машиностроения является решение проблемы экологической безопасности создаваемых машин. Перспективным является применение водяной смазки в подшипниках механизмов пищевой промышленности, гидромелиоративной техники, очистных сооружений.

Современные требования по обеспечению высокого уровня надежности при проектировании нового оборудования требуют создания эффективных методов анализа их работоспособности с учетом фактических условий эксплуатации.

Внедрение резинометаллических подшипников скольжения в новых отраслях машиностроения требует совершенствования методики расчета опорных узлов с уточнением режимов трения, деформаций и температур для оптимизации отдельных элементов конструкций в зависимости от условий работы.

Целью исследования является оценка влияния коэффициента заполнения и количества водоподводящих каналов на рабочие характеристики подшипников.

В качестве объекта для исследования принят подшипник водяного насоса. Диаметр вала подшипника составлял $d_b = 60$ мм, ширина подшипника $B = 90$ мм, наружный диаметр резинового покрытия $d_i = 73$ мм. Резиновое покрытие выполня-

лось из графито-каучуковой массы, состоящей из 20 % натурального каучука, 34 % синтетического рафинированного каучука, 30 % чешуйчатого жирного графита, 3 % стеарина, 12 % серы и 1 % контакса. Твердость резинового покрытия по Шору составляла $Sh = 82$, что соответствует модулю сдвига $G = 1,76$ МПа.

Нагрузка составляла $F = 1150$ Н, среднее давление $p_m = 0,211$ МПа, частота вращения $n = 955$ об/мин, окружная скорость $U = 3$ м/с.

Влияние количества сегментов и водоподводящих каналов на характеристики подшипника показано на рис. 1.

Толщина смазочной пленки увеличивается с ростом числа

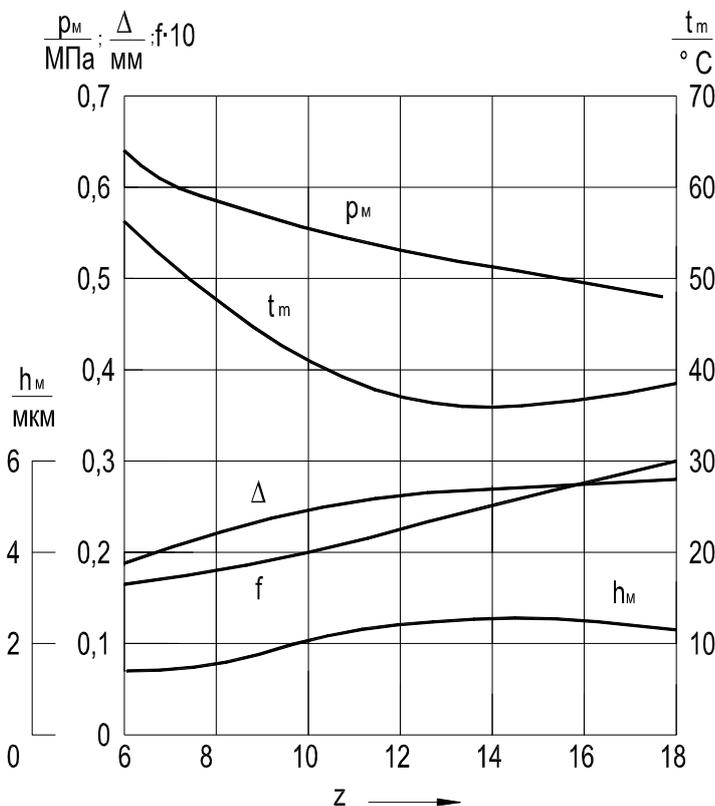


Рис. 1. Влияние числа сегментов на характеристики подшипников.

каналов до $12 \div 16$, оставаясь затем практически постоянной. Ориентируясь на графики деформаций и температур, для рассматриваемого подшипника можно рекомендовать $Z=8 \div 12$.

В подшипниках гидравлических турбин число водоподводящих каналов принимают от 8 до 24, подшипники гребных валов по стандарту выполняются с $Z=8$, а по данным литературы [1] для судовых подшипников принимают число сегментов $Z=3 \div 15$. Число сегментов 3 и 4 используется в подшипниках с диаметрами валов от 10 до 35 мм. Для подшипников с диаметрами валов от 40 до 100 мм рекомендуется $6 \div 8$ каналов.

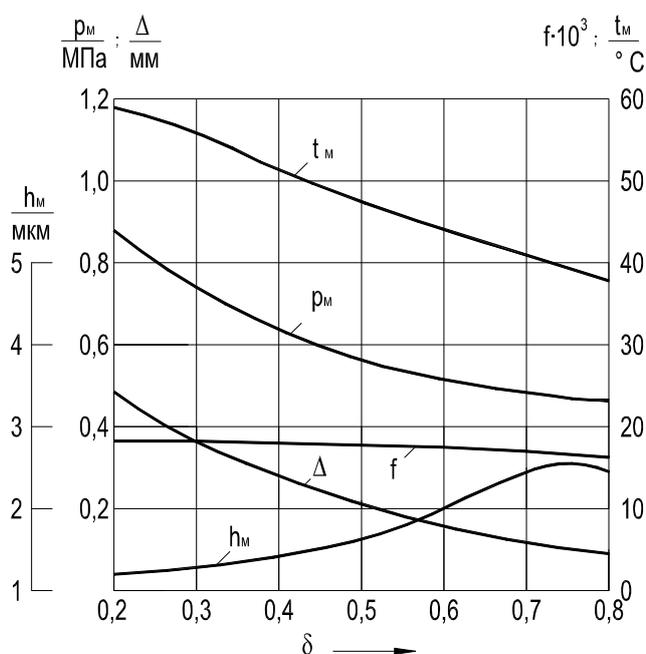


Рис. 2. Зависимость рабочих характеристик от коэффициента заполнения.

Коэффициент заполнения рабочей поверхности определяет деформационные способности опорного узла. На рис.2. приведены графики изменения рабочих характеристик с ростом коэффициента δ .

Увеличение коэффициента δ и размеров опорных площадок приводит к уменьшению площадей водоподводящих каналов, что затрудняет прокачку охлаждающей воды и ограничивает деформационные возможности.

В рассматриваемом подшипнике при коэффициенте заполнения, превышающем 0,7 деформируемая резина нагруженного сегмента, заполняет более половины площади канала. Увеличение сопротивления

проходу воды в данном случае компенсируется повышенной прокачкой.

Исследование влияния общего расхода воды через подшипник на его характеристики показало, что с увеличением прокачки холодной воды снижается температура рабочих поверхностей и несколько повышается толщина водяной пленки. Остальные характеристики практически не меняются. Минимально необходимый расход можно определить расчетным путем, ориентируясь на допускаемую температуру.

Выводы. 1. С увеличением числа каналов возрастает величина деформации и коэффициент трения, уменьшается температура и максимальное давление. Увеличение числа каналов способствует быстрому удалению абразивных частиц из зоны трения и повышает износостойкость опоры, но снижается ее жесткость. 2. Увеличение коэффициента заполнения приводит к снижению давления, деформации, температуры и увеличению толщины пленки. Коэффициент трения практически не меняется.

Литература: 1. Давыдов А.П. Резиновые подшипники в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1968. – 188 с. 2. Лавендел Э.Э. Расчет резинотехнических изделий. М.: Машиностроение, 1976. – 232 с. 3.Свиргун О.А. Методика расчета оптимальных форм рабочих поверхностей резиновых подшипников скольжения, смазываемых водой // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – Харків: ХДТУСГ.– 2004. – Вип. 24. – С. 41-45.

**МНОГОДИСЦИПЛИНАРНЫЙ АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЯ****Назаренко С.А.**, канд. техн. наук (г. Харьков, Украина)

Complicated finite-element models with high geometric and physical self-descriptiveness sensitivity analysis methods are given in this article. The methods have guiding to orientate on high dimensions of state and design variables. Computation stages of constructions gradients functional derivation are investigated. The developed mathematical apparatus application domains are examined.

Для автоматизации проектирования в настоящее время постоянно продолжает разрабатываться большое количество различных программных систем и комплексов. Наиболее известными среди отечественных разработок являются ПРОЧНОСТЬ, ПОЛЕ и другие. Среди зарубежных САПР можно выделить ANSYS, COSMOS, NASTRAN, CATIA, PRO/ENGINEER и ряд других. Большинство программных комплексов базируется на МКЭ, как мировом стандарте для расчета различных прочностных, динамических и других характеристик машин [1, 2]. В процессе развития расчетных программных комплексов стала очевидной необходимостью обеспечить сложные мультифизические возможности, позволяя анализировать не только гидрогазодинамические, тепловые, электромагнитные и механические явления, но также и их взаимодействие. Например, возможность выполнять смешанный гидрогазодинамический и прочностной анализ позволяет пользователям изучать эффекты взаимодействия потоков жидкостей с конструкциями на одной и той же модели, что является необходимым в различных областях, от проектирования крыльев самолетов до создания клапанов искусственного сердца.

Анализ чувствительности изучает взаимосвязь между переменными проектирования, определяющими геометрическую форму конструкции, ее свойства и т.д., и переменными состояния, которые определяются законами физики, т.е. реакцией конструкции [3]. Зависимость реакции конструкции, измеряемой такими величинами, как температура, давление, перемещение, напряжение и т.д., от переменных проектирования, неявно определяется уравнениями состояния физики конструкций.

Предпосылкой данной разработки является предположение о том, что всеобъемлющая теория многодисциплинарного анализа чувствительности может быть рассмотрена при помощи единого подхода, т.к. стационарные задачи теории поля (теплопроводность, гидромеханика, расчет электрических или магнитных полей и т.д.) сводятся к системе уравнений, аналогичной соотношениям метода перемещений МКЭ для линейных задач механики деформируемого твердого тела. Целью проведенных исследований была разработка теории и методов многодисциплинарного анализа чувствительности сложных конструкций на базе метода конечных элементов, являющегося наиболее мощным, универсальным и распространенным методом расчета.

Разработанная методика анализа чувствительности предполагает следующую последовательность вычислительных этапов: КЭ дискретизация задачи анализа; введение вектора сопряженных переменных; введение пространства проектных переменных; вычисление градиентов функционалов.

Рассмотрим технику дифференцирования функционалов для стационарного случая

$$Z(\bar{u}, \bar{y}) = K(\bar{u})\bar{y} - \bar{F}(\bar{u}) = \bar{0}, \quad (1)$$

где \bar{u} – вектор варьируемых конструктивных параметров системы, обобщенная матрица $K(\bar{u})$ и обобщенные векторы \bar{y}, \bar{F} интерпретируются в зависимости от физической постановки задачи. Например, для метода перемещений задач эластоупругости – это соответственно матрица жесткости системы и векторы узловых перемещений и нагрузок; для задач теплофизики – это соответственно матрица теплопроводности и векторы, характеризующие распределения температур и теплового потока и т.д. Методика получения характерных матриц и векторов и составления общей системы уравнений описана в [4].

В большинстве практических задач количество проектных переменных значительно превышает число исследуемых функционалов. Для таких задач метод, основанный на введении сопряженной задачи более эффективен, чем метод, построенный на прямом дифференцировании. Для отыскания градиента функционала качества $J = J(\bar{u}, \bar{y})$ в рассмотрение введем сопряженную задачу. С учетом симметрии матрицы жесткости она принимает вид $K^T(\bar{u})\bar{\psi} = K(\bar{u})\bar{\psi} = \bar{g} = \bar{\nabla}_y J$. Это уравнение описывает ту же конечноэлементную модель механической системы, но нагруженную фиктивной системой сил g , определяемой видом функционала качества. После ввода дискретного гамильтониана и учета матричного уравнения, полученного в результате дифференцирования задачи анализа (1), градиент функционала принимает вид

$$H = \bar{\psi}^T (K(\bar{u})\bar{y} - \bar{F}(\bar{u})) - J(\bar{u}, \bar{y}),$$

$$\bar{\nabla}_u J = \left\{ -\frac{\partial H}{\partial u_i} = -\bar{\psi}^T (K'_{u_i}\bar{y} - \bar{F}'_{u_i}) + \frac{\partial J}{\partial u_i} \right\}_{i=1, n}, \quad (2)$$

где производную от гамильтониана берем лишь по явно входящему \bar{u} . Градиент собственного значения (собственной частоты, критической нагрузки) имеет вид

$$\lambda'_{u_i} = \bar{y}^T [K' - \lambda M'] \bar{y} / \bar{y}^T M \bar{y}. \quad (3)$$

На рис. 1 и 2 приведены примеры решенных задач.

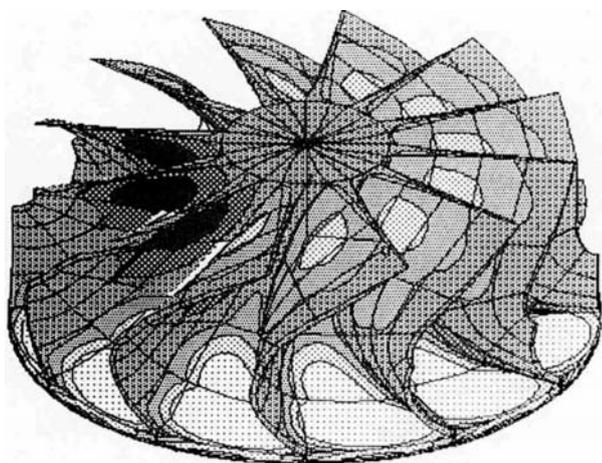


Рис. 1. Анализ чувствительности функционала максимальных эквивалентных напряжений от центробежной нагрузки к нормальным перемещениям точек поверхности рабочего колеса турбины ТКР-8.5-ТВ.

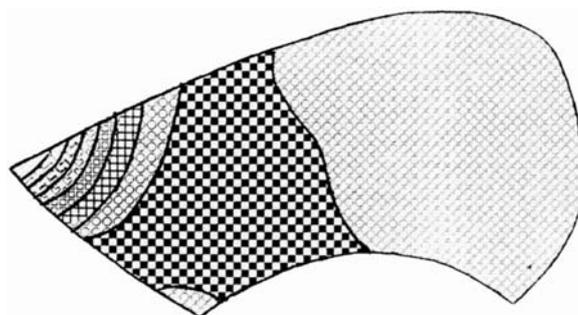


Рис. 2. Анализ чувствительности второй собственной частоты к изменению распределения толщин лопасти гидротурбины ПЛ 20-811 (ГЭС Варцихе).

Анализ чувствительности может применяться на различных этапах жизненного цикла изделия (от проектирования до эксплуатации и утилизации), т.к. коэффициенты влияния несут важную информацию о реакции проекта на отклонения от расчетных значений. Например, геометрические параметры реальной конструкции отличаются от своих проектных значений на величину, которая появляется в результате неточностей технологической обработки изделия. При этом происходит изменение расчетного значения критерия качества, по которому оценивалась работоспособность проекта. Отклонения ограничены полем допусков, которое представлено малыми величинами. Перед технологами стоит проблема обоснованного назначения поля допусков, которое, в свою очередь, определяет способ изготовления. Величина допуска должна зависеть от величины коэффициента чувствительности функционала к изменению толщины.

Литература: 1. Piegł L.A. Ten challenges in computer-aided design// Computer-aided design. 2005. №37. p. 461-470. 2. Гриценко Г.Д., Малакей А.Н., Миргородский Ю.Я., Ткачук А.В., Ткачук Н.А. Интегрированные методы исследования прочностных, жесткостных и динамических характеристик элементов сложных механических систем// Механіка та машинобудування. 2002. №1.-С. 6-13. 3. 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. 4. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике/М.:Мир, 1978. - 519 с.

УДК 620.9; 621.165; 539.3:534.1

ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ФАКТОРОВ НА СПЕКТР ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СИСТЕМЫ ДИСК-ЛОПАТКИ-СВЯЗИ

Воробьев Ю.С., докт. техн. наук, проф., **Гошкодеря В.П.,** канд. техн. наук,

Цыба А.Н. (г. Харьков, Украина)

The influence of various construction schemes of blading on its vibration characteristics is considered. The technical theory of pretwisted rods for a blade model is used. It provides efficiency of express - analysis of a system, and selection of the most rational blading schemes. Example of analysis of real impeller is given.

Введение. Современный этап развития энергомашиностроения характеризуется интенсивным внедрением в практику передовых технологий, как в области производства, так и в области проектирования. Одной из важных задач проектирования паровой турбины является создание надежных и экономичных рабочих ступеней. При этом приходится решать проблему выбора той или иной конструктивной схемы облопачивания. Существует несколько критериев, которые используются для решения этой задачи. Они регламентируются соответствующими нормативными документами, и задача заключается в том, чтобы найти наиболее рациональное решение в рамках требований этих документов.

Постановка проблемы. Одним из регламентируемых нормативными документами параметров является спектр частот собственных форм колебаний рабочих лопаток. Выбор схемы облопачивания, параметров межлопаточных связей, бандажных полок, числа лопаток в пакете, положения межлопаточных связей и других конструктивных элементов оказывает существенное влияние на спектр частот, прочностные и экономические показатели ступени. Поэтому необходимо находить рациональные решения и обеспечивать эффективную схему облопачивания. Эта работа связана с анализом ряда расчетных схем и принятием правильного решения. Для реализации этой задачи необходимы пакеты прикладных программ, которые позволя-

ют при минимальных затратах осуществлять экспресс-анализ нескольких рабочих схем.

Метод решения. В Институте проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного Национальной академии наук Украины разработаны алгоритмы и программы, которые позволяют решать задачи о колебаниях лопаточного аппарата различных схем облопачивания. Используется модель лопатки на основе технической теории закрученных стержней [1]. Диск рассматривается как круглая пластина переменной толщины, обод – как криволинейный брус. На этой базе создан комплекс методов, который дает возможность рассматривать систему с различными схемами облопачивания [2]. Задание исходных данных для различных элементов схемы и просмотр результатов осуществляется в интерактивном режиме из оболочки оконного интерфейса. Предусмотрена графическая визуализация данных. Это повышает оперативность задания входных данных и расчетов. Точность расчетов является достаточной для сравнительной оценки различных схем облопачивания. Это неоднократно подтверждалось путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными и данными расчетов по трехмерной конечноэлементной модели [1, 3]. Недостатком данного подхода является невозможность исследовать пластиночные формы колебаний, однако этот недостаток ощутим лишь для тех лопаток, у которых отношение хорды к высоте составляет более 20%.

Результаты работы. На рис. 1 показана схема, которая позволяет судить о структуре и возможностях разработки. Все структурные единицы объединены в единый логически увязанный комплекс программ. На этапе подготовки данных используются два подхода. Один из них позволяет в качестве входных данных использовать координаты профилей поперечных сечений рабочих лопаток, которые получены в результате газодинамических расчетов. Другой подход предусматривает

подготовку данных в интерактивном режиме путем заполнения их прототипа по лопатке, связям, диску и ободу диска.

Программный комплекс позволяет осуществить расчет любой структурной единицы облопачивания. В зависимости от конструктивного выполнения облопачивание можно рассчитывать по двум моделям в зависимости от степени влияния диска на спектр частот собственных форм колебаний.

Первая модель это – абсолютно жесткий диск, вторая модель – диск упругий. Случай абсолютно жесткого диска рассматривается тогда, когда его частоты значительно выше рассматриваемых частот колебаний лопатки и его влиянием на эти частоты можно пренебречь. Для упругого диска характерно существенное влияние на рассматриваемый диапазон частот системы и наличие дисковых форм колебаний.

Для каждого из этих вариантов рассматривается жесткая и упругая заделка

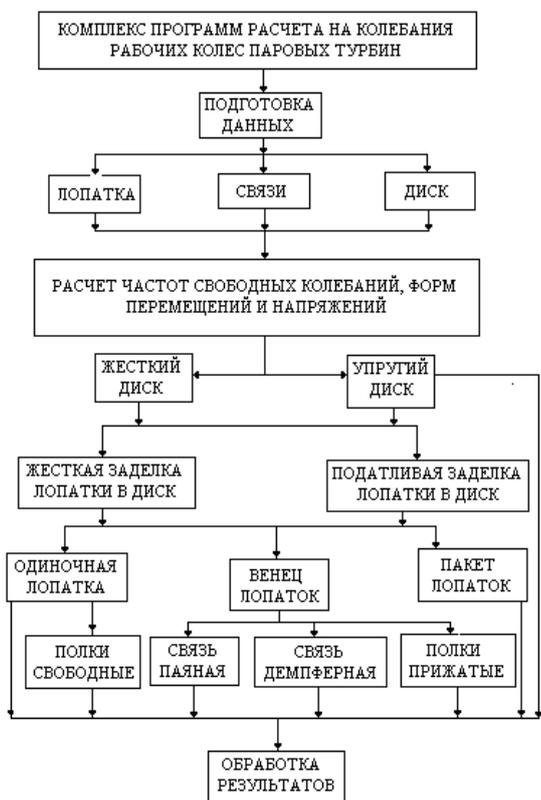


Рис. 1. Схема расчета на колебания рабочих колес паровых турбин.

лопаток в диск. Жесткость заделки лопатки в диск моделируется коэффициентами податливости. Для абсолютно жесткой заделки предполагается, что коэффициенты податливости e_{ξ} , e_{η} , $e_{p\xi}$, $e_{p\eta}$, e_{θ} равны нулю, [1, 4].

Рассматриваются различные типы межлопаточных связей, включая полочные. Для варианта свободных лопаток с полкой предполагается, что лопатки не вступают во взаимодействие по полке. В этом случае полка играет роль присоединенной массы. Облопачивание со сплошной связью рассчитывается как циклически симметричная система, замкнутая на круг. За счет изменения коэффициентов связи учитываются различные условия контакта полков от зазора до жесткого соединения [1].

В качестве примера рассматривалась прямая незакрученная лопатка длиной $l=13,07$ см. Вариант конструкции с податливой заделкой в данном случае определяется следующими значениями коэффициентов податливости упругой заделки $e_{\xi}=0,65E-6$, $e_{\eta}=0,28E-6$, $e_{p\xi}=0,85E-6$, $e_{p\eta}=0,85E-6$, $e_{\theta}=0,34E-6$, [4].

Полученные результаты помещены в таблицу.

Таблица

Распределение спектра частот собственных форм колебаний, Гц

№ формы	Жесткий диск				Упругий диск			
	Свободные полки		Прижатые полки		Свободные полки		Прижатые полки	
	Жесткая заделка	Податливая заделка						
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	774,7	631,3	843,5	692,9	774,7	631,3	843,6	693,1
2	1404,0	1064,2	1421,8	1071,9	1395,3	1062,8	1411,3	1070,4
3	3032,8	2919,0	4763,8	4107,6	1576,3	1568,5	1578,4	1568,8
4	4514,9	3893,7	5909,5	5373,9	3033,7	2919,8	4764,4	4108,1
5	6786,1	5840,4	8295,6	7405,3	4514,9	3893,7	5908,0	5373,2
6	9277,4	9137,0	9277,9	9277,8	6781,9	5838,0	8283,7	7399,4
7	9621,2	9277,5	11973,7	10508,2	9277,4	9114,7	9277,5	9277,4
8	11277,0	9933,0	12291,3	11441,1	9585,2	9277,5	11148,5	10508,8
9	13772,2	12476,9	18254,5	16017,6	11221,2	9932,6	11985,7	11116,8
10	18790,7	17122,3	20727,4	19599,5	11281,9	11224,5	12337,2	11524,3

Осуществлен расчет восьми возможных схем облопачивания. В таблице представлены частоты десяти форм свободных колебаний. Анализ этих результатов удобно осуществлять на основе графического представления. В этом случае, при выборе типа облопачивания, хорошо просматривается влияние конкретного конструктивного решения на значения частот собственных форм колебаний.

На рис. 2 показаны графики изменения спектра собственных частот для первых двух форм колебаний рассматриваемой системы в зависимости от выбранной конструктивной схемы облопачивания k . Наглядно видно, что в зависимости от предъявляемых требований к той или иной форме колебаний можно выбрать эффективную схему облопачивания. На рис. 3 показан диапазон изменения значений частот по каждой из семи представленных собственных форм колебаний для всех k в диапазоне от 1 до 8, исследуемых в данной работе схем облопаченного

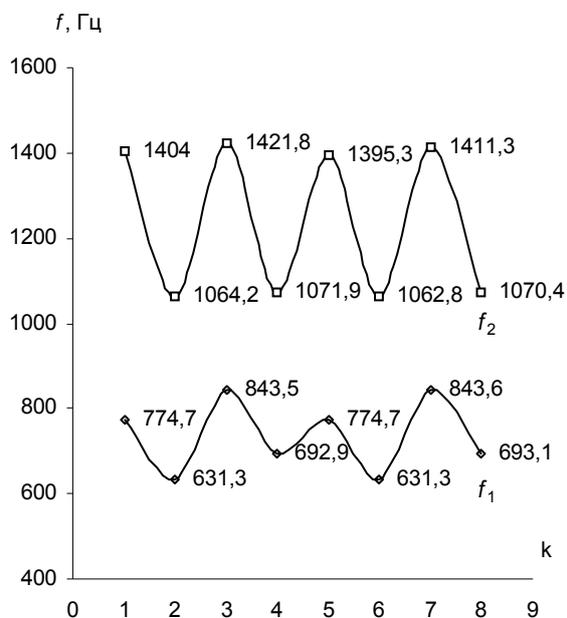


Рис. 2. Распределение частот первых двух форм колебаний для восьми схем облопачивания.

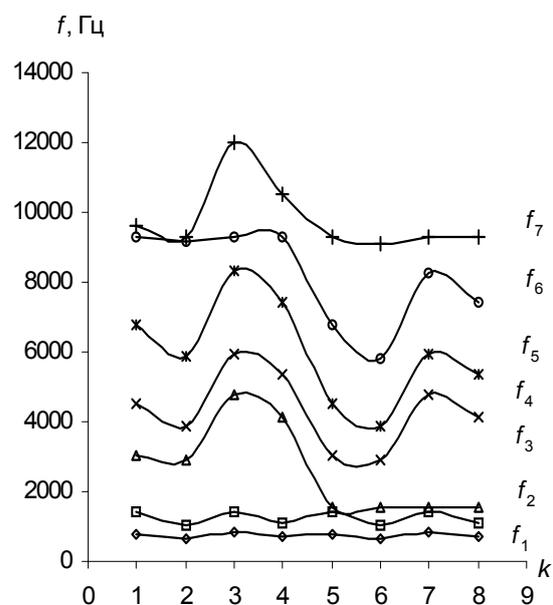


Рис. 3. Распределение частот первых семи форм колебаний для восьми схем облопачивания.

диска. В данном случае представляется возможность проанализировать поведение частот для более высоких собственных форм колебаний.

Из рисунка 2 видно, что при различных схемах облопачивания иногда получаются близкие собственные частоты системы. Так как необходимо, чтобы собственные частоты лежали в заданных диапазонах, то данные результаты показывают возможность реализовать эти требования с помощью рациональных конструктивных решений. Можно выбрать технически простые и дешевые, легко осуществимые схемы облопачивания для достижения требуемого спектра частот. Необходимо заметить, что рис. 2 является более детальной иллюстрацией результатов по первым двум частотам рис. 3. Дальнейшее уточнение вибронпряженного состояния выбранной на основе экспресс-анализа схемы облопачивания можно осуществлять на основе трехмерного конечноэлементного подхода.

Заключение. Таким образом, разработанный комплекс программ может применяться при проектировании лопаточного аппарата современных паровых турбин, а также при решении вопроса модернизации имеющихся конструктивных схем. Основным достоинством данного комплекса является достаточная точность результатов, высокое быстродействие, простота модификации входных данных, возможность исследовать несколько конструктивных схем облопачивания.

Литература: 1. Воробьев Ю.С. Колебания лопаточного аппарата турбомашин. Киев: Наук. думка, 1988. – 224 с. 2. Воробьев Ю. С. Исследование колебаний рабочих колес паровых турбин на основе стержневой модели лопатки / Ю.С. Воробьев, В.П. Гошкодеря, А.Н. Цыба // Физические и компьютерные технологии: 8-я Международная научно-техническая конференция (9-10 декабря 2003 г.). – Харьков, 2003. – С. 216-218. 3. Воробьев Ю.С. Использование моделей различных уровней при анализе колебаний лопаток последних ступеней паровых турбин / Ю.С. Воробьев, В.П. Гошкодеря, А.Н. Цыба, Л. Тайч, М. Турински // Физические и компьютерные технологии: 7-я Международная научно-техническая конференция (27-28 мая 2003 г.). – Харьков, 2003. – С. 208-210. 4. Воробьев Ю. С. Влияние податливости заделки лопатки в диск на частоты собственных колебаний / Ю.С. Воробьев, В.П. Гошкодеря, А.Н. Цыба // Физические и компьютерные технологии: 9-я Международная научно-техническая конференция (3-4 июня 2004 г.). – Харьков, 2004. – С. 157-160.

ЦІНКА ІННОВАЦІЙНОГО РІВНЯ ПРОДУКЦІЇ

Тернюк М.Е., докт. техн. наук, Копійченко Ю.В., канд. техн. наук,
Дмитрук І.А., канд. техн. наук, Бахнова Е.Л. (м. Харків, Україна)

Offered method of a qualitative and quantitative estimation innovation of a level of production as one of the important integrated parameters allowing at a stage of creation production to estimate her) industrial properties and market appeal. The dependences allowing defining an investment level as one -, so and multifunctional of production.

Вступ. Для оцінки продукції, що розробляється, повинні враховуватись різноманітні аспекти прояви її у всіх просторах та фазах життєвого циклу.

Особливо важливе значення мають інтегральні показники інноваційного рівня, які дозволяють комплексно оцінити виробничу та ринкову привабливість продукції.

До останнього часу такі показники визначались експертно або евристично. Внаслідок цього їх застосування в сучасних системах автоматизованого проектування та економічних розрахунків було обмежене. Звідси витікає актуальність розробки аналітичних методів оцінки інноваційного рівня продукції.

Основний текст статті. Оцінка показників інноваційного рівня об'єктів може проводитись з допомогою якісних і кількісних, відносних і абсолютних показників.

В основу якісних показників оцінки кладеться дихотомія "стара-нова". Розвиток цієї дихотомії по часу назад і вперед породжує більш деталізовану градацію характеристик багатокладного розвитку техніки. Її можна позначити таким ланцюгом термінів: архаїчна - стара - нова - піонерська.

Ця градація відповідає чотирьом ізохронним процесам в межах поліхронного процесу еволюції техніки. Ізохронні процеси є процесами розвитку певних видів об'єктів. Їх головною ознакою є типова закономірність зміни кількісних характеристик - обсягів виробництва і застосування об'єктів в залежності від часу.

Кількісні співвідношення між обсягами виробництва і реалізації продукції N_i , і $\in \{A, C, H, P\}$, а також між періодами T_i ізохронних процесів в межах поліхронного процесу їх еволюції, є такими: $N_A < N_C < N_H < N_P$; $T_A < T_C < T_H < T_P$, де індекси A, C, H, P – означають належність параметру до архаїчного, старого, нового та піонерського процесів (рівнів) відповідно.

Наведені співвідношення відображають відомі тенденції кількісного росту техносферних елементів та зменшення періоду їх оновлення з часом.

Належність об'єкту до того чи іншого ізохронного процесу в певний час визначає абсолютну оцінку новизни на якісному рівні, яка позначається введеними термінами: архаїчна, стара, нова, піонерська.

Відносну якісну оцінку можна отримати, присвоївши відповідну категорію новизни базовому об'єкту і визначивши розташування об'єкту, що оцінюється, на часовій осі. При цьому поняття "архаїчне" та "піонерське" застосовують у випадках, коли виявляється, що об'єкти не менше, ніж на один ізохронний цикл зміщені відповідно вліво чи вправо. Для поняття "піонерське", крім того, потрібно, щоб об'єкт відносився до нової сфери застосування. Цим він відрізняється від об'єктів, що відносяться до категорії нових. Нових промислових сфер застосування об'єктів, які належать до архаїчних, немає за визначенням.

Прикладом застосування такої класифікації до машин для польоту може бути наступне.

Якщо базовим об'єктом з оцінкою “стара” визначається дирижабль, то повітряна куля є "архаїчною", літак може мати оцінку “новий”, а ракета - “піонерський”.

Оскільки новизна сфери застосування детермінується новизною простору, мети та функції, оцінка елементу як “піонерський” може мати місце при умові, що простір, мета і функція визначені відповідно як піонерські. Ці об'єкти на певних етапах розвитку можуть бути не проявленими у семіотичному чи реальному фізичному просторах, а існувати лиш у просторі мислення.

Кількісними абсолютними оцінками новизни об'єктів можуть бути показники часу (дати) проявлення їх у просторах мислення, семіотичному чи реальному фізичному. Цим просторам відповідають певні фази життєвого циклу.

Контроль часу прояву у просторі мислення не може бути здійсненим зовнішнім спостерігачем. В зв'язку з масштабністю інноваційної діяльності є певні складності також у контролі проявів об'єктів у глобальних семіотичному та реальному фізичному просторах. В зв'язку з цим, абсолютними показниками по часу (даті) проявлення об'єкту у семіотичному чи реальному фізичному просторах часто визначається показник - дата юридично значимої фіксації пріоритету у відповідних органах по охороні авторських чи патентних прав.

Однією з найпростіших схем визначення кількісних оцінок інноваційного рівня на основі якісно-кількісних оцінок новизни об'єктів є присвоєння відповідних числових значень наведеним вище якісним характеристикам новизни для можливих варіантів їх поєднань. Оцінка інноваційного рівня об'єктів проводиться на основі оцінки рівня новизни застосованих технологій і техніки.

На рис.1 наведена схема, де зображено в координатах якісних рівнів новизни траєкторія (ОР) оптимального (збалансованого) розвитку об'єктів

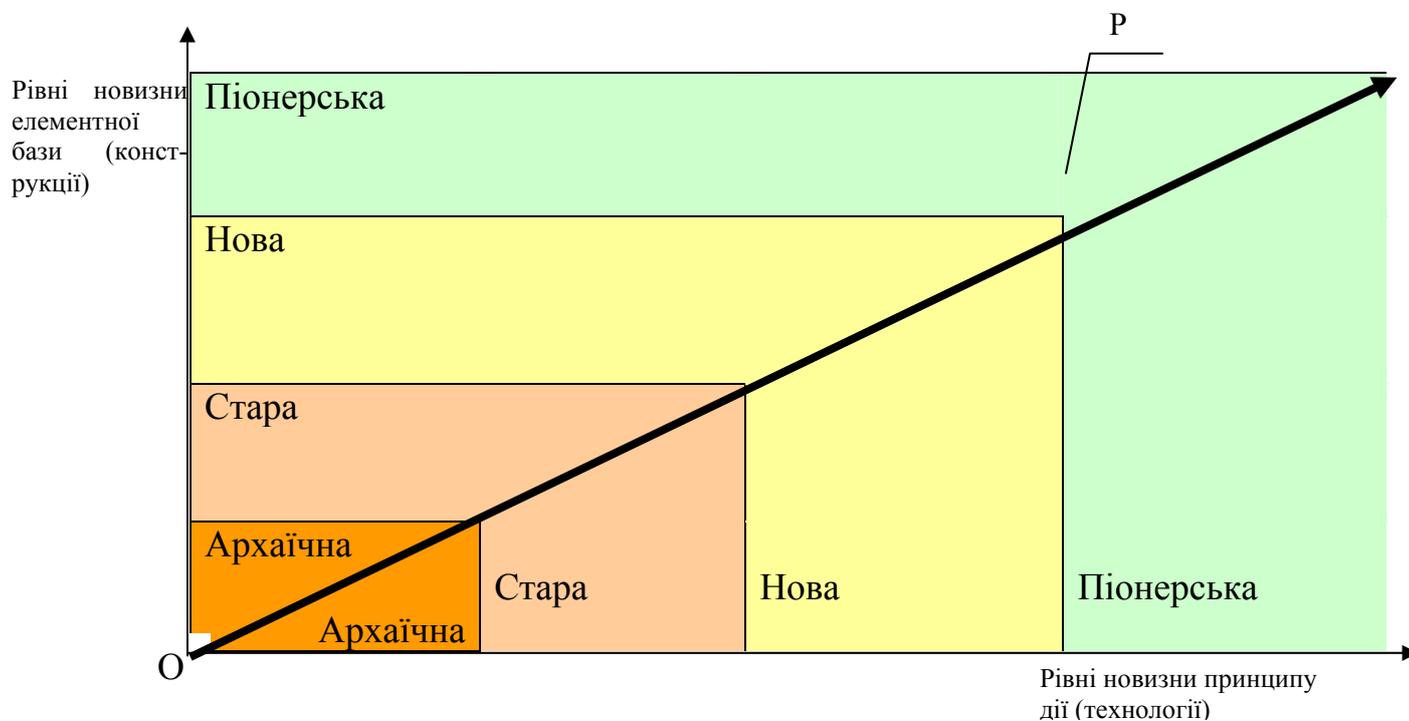


Рис. 1. Траєкторія (ОР) оптимального розвитку об'єктів.

Розвиток по лінії ОР означає збалансованість розвитку по елементній базі (конструкції) і по принципах дії (технології).

Відхід у верхню частину за лінію ОР координатної площини означає відставання по новизні технології, а вихід у нижню частину під лінію ОР – відставання по

новизні конструкції.

Сильніше за конструкцію на розвиток продукції впливає технологія.

Виключаючи повтори, якщо кожному якісному рівню новизни присвоїти одиницю, рахуючи, що об'єкти з ієрархічними рівнями по обох координатах практично не мають ринкової привабливості (виходять в іншу площину оцінки, наприклад як музейні експонати), варіант базової системи кількісної оцінки інноваційних рівнів продукції може мати вигляд, наведений в таблиці 1.

Таблиця 1.

Базова система кількісної оцінки інноваційних рівнів продукції

Якісні оцінки елементів		Інноваційний рівень	
принципу дії	елементів	символьне позначення	кількісна оцінка
Піонерський	Піонерські	П-П	7
Піонерський	Нові	П-Н	6
Новий	Нові	Н-Н	5
Новий	Старі	Н-С	4
Старий	Нові	С-Н	3
Старий	Старі	С-С	2
Архаїчний	Старі	А-С	1
Архаїчний	Архаїчні	А-А	0

В таблиці 1 виділено найнижчий нульовий рівень, що відповідає оцінці елементів як архаїчних. Для більшості видів сучасної техніки нульовому рівню відповідають, як правило, зняті з виробництва передуючі машинам пристрої. Наприклад, у сфері транспорту це: коляски, колісничі та інші засоби, де джерелом енергії є мускульна сила (архаїчний принцип дії). Якщо вони виготовлені в давні часи (архаїчні елементи), їх можна оцінити як такі, що мають нульовий інноваційний рівень (А-А). Перший рівень (А-С) можуть мати транспортні засоби такі ж за принципом дії, але з більш новою елементною базою. Автомобіль, як транспортний засіб без додаткового обладнання, що складений з традиційних елементів, має другий рівень (С-С). Третій рівень (С-Н), при якому відомий ("старий") принцип дії реалізується з допомогою нової елементної бази, властивий новітнім автомобілям.

Четвертий рівень (Н-С) вимагає переходу до нових принципів дії (технології). Як правило, це макети та експериментальні зразки техніки.

Для випадку, що розглядається, старий принцип дії, передбачає прямий контакт елементів автомобіля з поверхнею дороги. Варіант нового принципу дії - наявність прошарку повітря (чи іншої газоподібної речовини) між елементами транспортного засобу та дорогою. Такий принцип дії може реалізуватись, наприклад, екранолітом.

Якщо ця машина виготовлена як комбінація відомих елементів, це машина четвертого рівня (Н-С). Коли ж елементи спеціально створені, тобто, нові - машина має п'ятий інноваційний рівень.

Більш високі рівні 6-й (П-Н) і 7-й (П-П) можуть мати транспортні засоби для переміщення в новій сфері, наприклад, в космічному просторі, відповідно з новою та піонерською елементною базою. Наприклад ракетно-космічні системи

Вказана класифікація є однією з найпростіших числових класифікацій. В цьому полягає її перевага. Головний недолік – не досить очевидні критерії віднесення об'єктів до відповідних класів.

Розроблена класифікація доцільна для машин, які мають відносно малий обсяг додаткових (допоміжних) функцій та типові системи управління.

Її можна застосувати для багатофункціональних машин і систем машин, утворивши більш загальні класифікації, що, враховують наявність множин та тріадний характер будови структури функцій.

Якщо поставити кожному елементу тріадної структури функції машини наведену вище схему кількісної оцінки (таблиця 1), можна отримати диференційну класифікаційно - структурну формулу для монофункційних машин загального виду:

$$K = (K_o + K_q + K_y)/3, \quad (1)$$

де K - загальний інноваційний рівень об'єкта, $K_j, j \in \{o, q, n\}$, інноваційні рівні елементів машин, що реалізують основні, додаткові та інформаційно-управлінські функції.

Згідно формули (1) найвищий рівень має машина при $K = (7+7+7)/3=7$, найнижчий - при $K = (0+0+0)/3=0$. Наведена залежність дозволяє оцінити інноваційний рівень об'єкту для випадків, коли об'єкт має по одній основній, допоміжній та управлінській функції. Для оцінки інноваційного рівня об'єктів з великим числом основних, допоміжних та управлінських функцій класифікаційно-структурну формулу можна записати у вигляді

$$K = \frac{\sum_{j \in J} K_j}{|J|}, \quad J \{o_1, o_2, \dots, o_m, q_1, q_2, \dots, q_n, \dots, y_1, y_2, \dots, y_l\},$$

де m, n, l - кількість основних, додаткових та управлінських функцій, що реалізуються об'єктом.

Більш виважену загальну інтегральну числову оцінку інноваційного рівня об'єктів з багатьма функціями, що мають різний вплив на K , можна отримати, якщо врахувати в середньоарифметичному показнику коефіцієнти ваги функцій:

$$K = \frac{\sum_{j \in J} K_j q_j}{|J|},$$

де q_j - нормований коефіцієнт ваги j -ї функції.

З значення коефіцієнтів q_j можна визначити статистичним методом.

Висновки. Інноваційний рівень продукції (техніки і технологій) є одним з її важливих інтегральних показників, який може мати якісну і кількісну оцінку. Розроблені залежності дозволяють визначити цей показник як для одно-, так і для багатофункціональної продукції.

5. ЭЛЕКТРОФИЗИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.316.9

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАСЧЕТОВ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Колиушко Д.Г., канд. техн. наук, **Обруч И.В.**, **Петков А.А.**, канд. техн. наук
(г. Харьков, Украина)

The singularities of the graphic interface of the program complex intended for lightning protection calculations of structures are considered.

Защита зданий и сооружений от первичных и вторичных факторов воздействия на них разрядов молнии является в настоящее время актуальной задачей, о чем свидетельствует постоянное обновление национальных и международных нормативных документов в области молниезащиты [1, 2]. До недавнего времени в основном проводился лишь анализ системы молниезащиты, а при построении ее на новых объектах использовался, как правило, опыт ранее спроектированных.

С развитием вычислительной техники появилась возможность моделирования систем молниезащиты как простых (здание), так и сложных (высоковольтная подстанция) объектов при помощи специальных программ, разработанных для персональных ЭВМ. Подобная программа разработана в НПФ "ЭЛНАП" (г. Москва) [3]. Она позволяет с помощью графического интерфейса вводить топологию исследуемого объекта (здания, сооружения и молниеотводы) и по построенной расчетной схеме производить расчет системы молниезащиты по одной из трех методик: РД 34.21.122-87 [4]; международного стандарта МЭК 61024 [5]; Энергосетьпроекта (применяется только на территории России).

После проведения расчета имеется возможность визуально оценить степень защищенности объектов по двумерным или трехмерным изображениям поверхности зон молниезащиты. Однако указанная программа обладает рядом недостатков, основными из которых являются: отсутствие возможности построения зданий произвольной формы и их математической обработки; ограничение на количество сооружений объекта и анализируемых молниеотводов; отсутствие возможности синтеза системы молниезащиты.

Известна также экспертная система для оценки молниезащиты зданий и сооружений [6]. Она не обладает графическим интерфейсом, обеспечивает анализ защищенности только одного здания имеющего форму параллелепипеда или цилиндра. С использованием указанной экспертной системы невозможно рассчитывать зоны молниезащиты по методике МЭК. Кроме того, также как программа, разработанная в НПФ "ЭЛНАП", она не содержит опций синтеза.

В настоящее время в НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" разрабатывается программный комплекс (ПРК), представляющий собой 32-разрядное приложение, работающее в операционной системе Windows фирмы Microsoft Corporation, на основе многодокументного интерфейса (блок-схема приведена рис. 1). Выбор такой платформы обусловлен распространенностью данной операционной системы, а интерфейса – задачей создания удобного для пользователя программного продукта, обеспечивающего высокую скорость и точность расчетов, наглядность и простоту ввода исходных данных. В разрабатываемом ПРК сняты ограничения, характерные для упомянутых выше программных продуктов, в частности, отсутствует ограничение на ко-

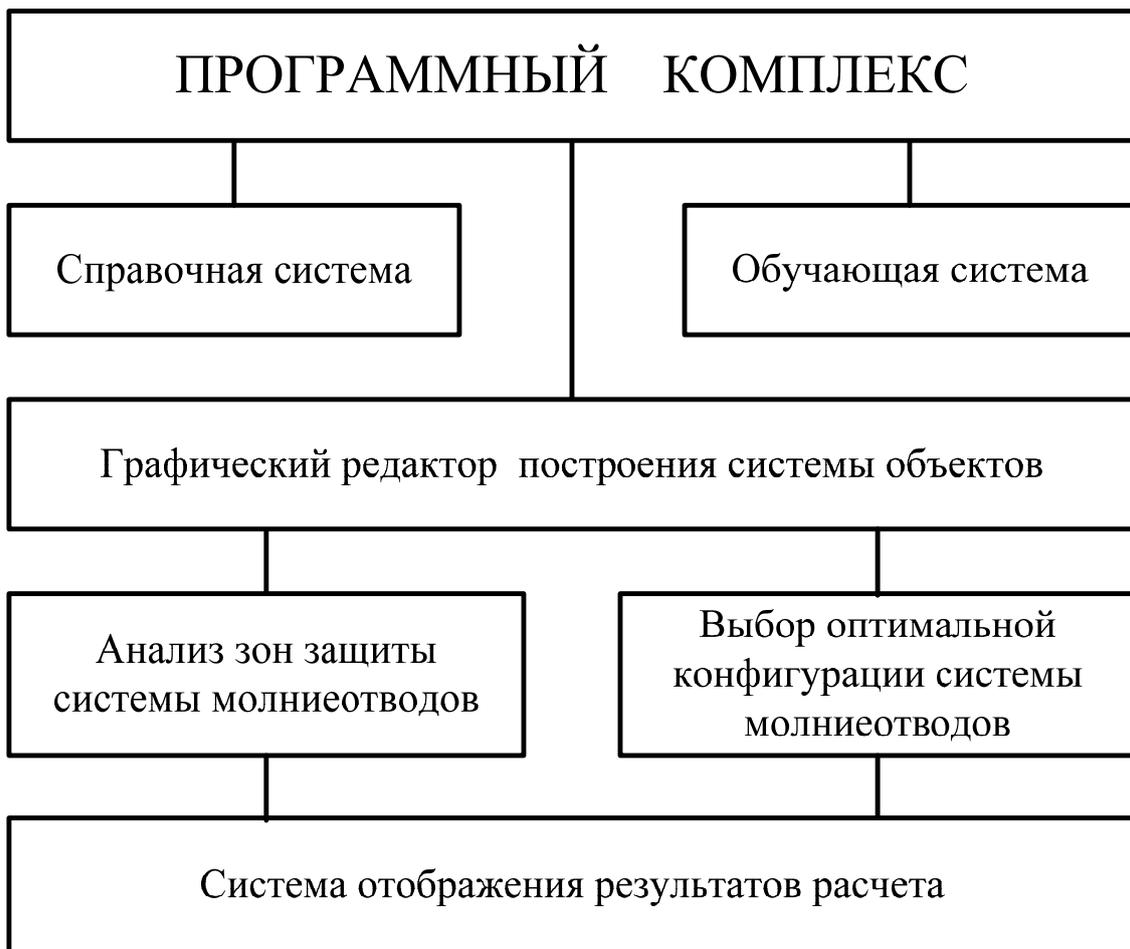


Рис.1. Блок-схема программного комплекса.

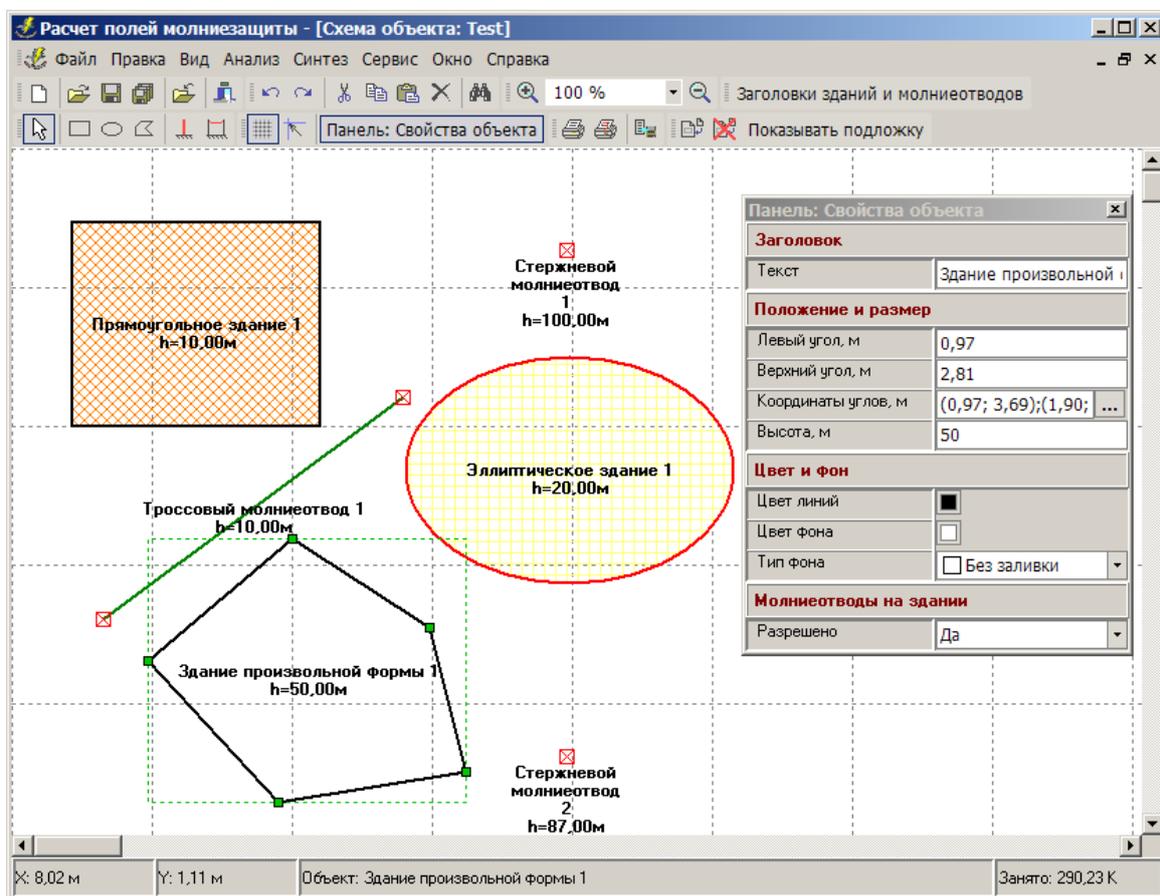


Рис. 2. Основное окно программы.

личество объектов и их форму, а также предусмотрен синтез системы молниеотводов.

В настоящей работе остановимся на особенностях графического интерфейса разрабатываемого ПРК.

Основное окно ПРК состоит из строки главного меню, ряда панелей инструментов, при помощи которых запускаются те или иные подзадачи, и графического редактора (возможна работа с его несколькими копиями), при помощи которого вводится информация о взаиморасположении и геометрических размеров защищаемых зданий различной формы. Графический редактор реализован при помощи неоконных элементов, т.е. не имеющих дескрипторов. За счет этого снимается ограничение на их количество, которое имеет место при использовании операционной системы Windows. Это также позволило: снять ограничение на число вводимых зданий и молниеотводов; увеличить скорость работы ПРК, особенно в процессе отрисовки схемы; существенно уменьшить объем оперативной памяти, занятой под данные (не более 1 Кб под каждое здание), что в свою очередь, позволяет снизить требования к компьютеру. Так, при использовании персонального компьютера на базе процессора Pentium 200 MMX со 128 Мб оперативной памяти, неудобств, вызванных медленной работой ПРК не возникает.

Геометрическая информация о зданиях (положение и размеры) и молниеотводах в графическом редакторе может вводиться, как при помощи «мышки», так и при помощи клавиатуры. Реализована удобная панель инструментов «Панель: Свойства объекта», позволяющая уточнять координаты и отображения зданий и молниеотводов в режиме набора с клавиатуры. Разработанный графический редактор предоставляет следующие основные возможности:

- рисование зданий произвольной формы и молниеотводов различных типов (стержневых и тросовых, в том числе и активных);
- перемещение, изменение размеров, удаление зданий и молниеотводов.
- рисование зданий различным цветом и их заливки;
- поддержка буфера обмена Windows;
- рисование по подложке, в качестве которой используется расширенный мета-файл формата *.emf;
- отображение сетки с различными шагами по оси X и Y;
- использование режима привязки к сетке для обеспечения более точного ввода графической информации;
- сохранение и загрузка введенных данных в файле специального формата;
- печать результатов работы ПРК на принтере, или их экспортирование в файл в виде графиков.

Основное окно программы с произвольным набором объектов представлено на рис. 2.

Выводы. 1. Дан краткий анализ программ для расчета систем молниезащиты, существующих в настоящее время, и указаны их недостатки. 2. Описан графический интерфейс разрабатываемого в НИПКИ "Молния" программного комплекса, построенного с использованием неоконных элементов, что позволило снять ограничение на количество исследуемых зданий, сооружений и молниеотводов, увеличить скорость отрисовки, а также уменьшить объем занимаемой оперативной памяти ЭВМ.

Литература: 1. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 57 с. 2. IEC 62305-3. Ed. 1/CDV. Protection against lightning. Part 3: Physical damage to structures and life hazard. 3. Борисов Р.К., Петров С.Р. Компьютерные программы для анализа и проектирования устройств заземления и молниеза-

щиты // Первая Российская конференция по заземляющим устройствам: Сборник докладов / Под ред. Ю.В. Целебровского – Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, - 2002. – С. 41 – 43. 4 Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений (РД 34.21.122-87). – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 56 с. 5. IEC standard 61024-1-1 (1993 г.) Protection of structures against lightning. Part 1: General principles. Section 1: Guide A – Selection of protection levels for lightning protection systems. 6. Серков А.А., Толкачев М.Ю. Разработка экспертной системы для оценки молниезащиты зданий и сооружений // Вестник национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Сборник научных трудов. Тем. вып.: "Энергетика и преобразовательная техника". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2004. №5, – С. 16 – 23.

УДК 331.108

КАДРОВЫЙ ПОТЕНЦИАЛ И ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ

Савченко Н.Н., аспирант
(г. Харьков, Украина)

Some features of control of development of staff on firm in conditions of economical instability are reviewed.

Важнейшим обстоятельством формирования кадрового потенциала в условиях экономической нестабильности является то, что персонал многих, особенно наукоемких предприятий находится в условиях, далеких от желаемых, что приводит к оттоку наиболее высококвалифицированных кадров, к их внутренней или внешней миграции [1-3]. Как второе обстоятельство, можно отметить то, что персонал может быть объективно не заинтересован в повышении эффективности использования прогрессивных методов организации труда и основных средств производства из-за возможности сокращения штата работников. Это снижает внутреннюю мотивацию персонала и развития кадрового потенциала предприятий, сказываясь в усложнении взаимоотношений с руководящим персоналом, приводит к возникновению конфликтов, усложняя процессы структурных преобразований персонала, обусловленные требованиями научно-технического прогресса и рынка. Проблемой является постоянно возрастающий уровень старения рабочей силы.

Поэтому целью исследования является совершенствование гибких, с позиций системного подхода методов развития кадрового потенциала, основываясь на понимании возрастающей роли человеческого фактора как на индивидуальном уровне, так и с позиций групп, команд, производственных коллективов. С этих позиций социально – экономические цели организации управления кадрами представляются как комплекс важнейших функций управления кадровым потенциалом предприятия, которые реализуются в программах развития культуры и образования; в совершенствовании системы профессиональной подготовки и повышения квалификации; в изменении содержания труда, форм его организации и мотивации; в рационализации форм и методов подбора, оценки, продвижения работников и учета особенностей углубления разделения труда, развития производительных сил в обществе, совершенствования рынка тренинговых услуг в Украине.

Существенное значение в условиях экономической нестабильности предприятия (его финансовая неустойчивость, нерегулярная выплата зарплат, отсутствие стимулов для персонала, низкая конкурентоспособность продукции и потеря рынков и др.) приобретают вопросы повышения кадрового потенциала при минимальных возможностях финансирования затрат на повышение квалификации персонала и ограничен-

ностью (пассивностью) его структурных изменений.

В этих условиях приобретают особое значение вопросы профессионального обучения непосредственно на рабочем месте с привлечением специалистов предприятия (внутренняя среда), так и специалистов со стороны (внешняя среда). По форме организации обучение может как непосредственно на рабочем месте, так и вне его, в виде непосредственных или виртуальных контактов. Как формы обучения и повышения квалификации выделяются инструктаж, лекция, первоначальное обучение (ученичество), ротация персонала, наставничество, метод усложненных заданий, решение практических задач, моделирование ситуаций, различных типы тренинга (сензитивности, игры).

Проблемой, решаемой при организации обучения, становится прогнозирование его эффективности, что непосредственно связано с оценкой изменения кадрового потенциала, возникновением проблемы ухода с предприятия сотрудников, повысивших квалификацию.

С этих позиций представляется рациональным четкое понимание персоналом миссии (главной цели) предприятия, стратегическое развитие которого должно быть ориентировано на создание конкурентоспособной продукции в условиях направленной стабилизации внутренней среды предприятия (гарантированная занятость, соблюдение стандартов развития и мотивации персонала).

Затраты на развитие персонала (в том числе и на мотивацию) с целью ориентации на стабилизацию положения предприятия, его внутренней среды, могут быть определяться по формуле:

$$C_p = \sum_{i=1}^T V_i Z_i P_i,$$

где V_i – объем выпуска продукции в i -м году;

Z_i – цена единицы продукции в i -м году;

P_i – размер возможных отчислений в i -м году;

T – расчетный срок влияния эффективности повышения квалификации.

Таким образом, развитие персонала может не только предусматривать понимание особенностей конфликтного состояния, но и заранее предусмотреть один из аспектов объединения персонала на базе общих стимулов, непосредственно связанных с наращиванием объемов продукции.

Литература: 1.Василенко Д.. Випробування при прийнятті на роботу: порядок оформлення. Справочник кадровика. 2004, №6, с.44 – 48. 2. Савченко В.А. Управління розвитком персоналу.– К.: КНЕУ, 2002. – 351 с. 3.Коваль В. Впровадження гнучких інноваційних технологій професійного навчання. Справочник кадровика. 2004, №7, с.68 – 76.

УДК 621.31

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАЩИТНОГО ДЕЙСТВИЯ МОЛНИЕОТВОДОВ

Куприенко В.М., канд. техн. наук, (г. Санкт-Петербург, Россия)

This paper presents results of tests of discharge formation in the air gaps (from 4 up to 25 meters). Explanation of the choice of positive polarity pulse for the tests of lightning protection systems is given.

Нормы и рекомендации [1-3], устанавливающие требования к зонам защиты

молниеотводов базируются на результатах лабораторных исследований, выполненных различными авторами [4-9] и статистических данных наблюдений по поражению объектов, в том числе и защищенных молниеотводами. При проведении лабораторных исследований важно обеспечить подобие развития разряда в искровом промежутке и разряда естественной молнии.

Для естественной молнии характерна зигзагообразность канала лидера, обусловленная его ступенчатым развитием и случайным направлением в пространстве каждой ступени при средней разрядной напряженности порядка 15кВ/м [5-7]. Длина ступени лидера занимает незначительную часть разрядного промежутка «облако-земля» и зависит от ряда естественных факторов. В среднем длина ступени лидера составляет 10-200м [5,6]. При воспроизведении молнии в лабораторных условиях сохранение ступенчатого характера развития канала лидера и его случайного (вероятностного) направления удара является одним из важнейших аспектов моделирования.

В лабораторных условиях минимальную разрядную напряженность (150-200кВ/м) можно получить при пробое воздушных промежутков коммутационными импульсами напряжения длительностью 1,0-2,5мс [5,6,7,9]. В исследованиях, проводимых различными авторами, длительность фронта коммутационного импульса варьировалась от 1,5мкс [4] до 3000мкс [5-7].

При малой длительности фронта коммутационного импульса пробой воздушных промежутков происходит далеко на спаде импульса, что существенно ограничивает коэффициент использования импульсного генератора и длину воздушных промежутков [4,5]. В промежутках малой длины ступенчатый характер развития лидера отсутствует, и разряд изначально ориентирован на выступающие над заземленной плоскостью предметы. Направление разряда сильно зависит от положения высоковольтного электрода над испытуемой системой молниезащиты. Поэтому обязательным условием при исследовании молниезащиты в промежутках малой длины является поиск «наиболее опасного» положения высоковольтного электрода [4,9].

Зигзагообразный (ступенчатый) характер развития искусственной молнии наблюдается в длинных (10м и более) воздушных промежутках при импульсах напряжения положительной полярности [5,6]. Потому, несмотря на то, что большинство молний (80-90%) переносят на землю отрицательный заряд, при экспериментальных исследованиях подобие натурным условиям развития молнии любой полярности обеспечивается применением импульса напряжения положительной полярности с фронтом нарастания более 100 мкс [5,7,9].



Рис. 1. Серия из пяти разрядов в воздушном промежутке $s=15\text{м}$ при испытании молниеотводов высотой 3,2м.

Применение пологих импульсов напряжения в лабораторных исследованиях молниезащиты обосновано также тем, что развитие лидера должно обеспечиваться в пределах роста фронта приложенного импульса [5]. Результаты исследований, приведенные в [5,6,8] получены при длительности фронта импульса

$t_{\phi}=3000\text{мкс}$ в промежутках длиной $S=10\text{-}15\text{м}$. Для формирования импульсов напряжения использовался трансформаторный каскад фирмы TUR.

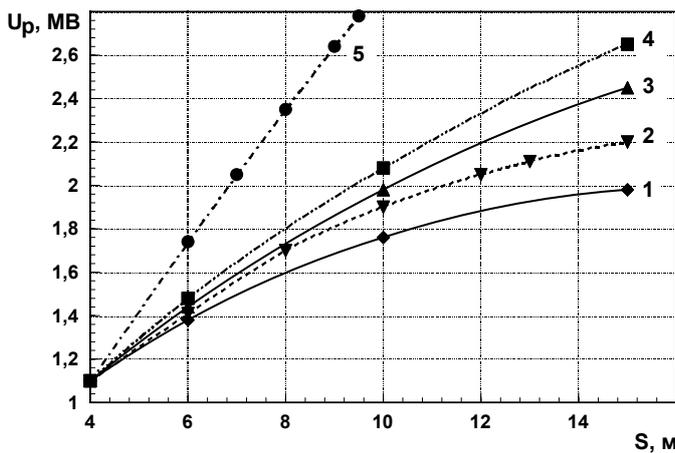


Рис .2. Результаты исследований электрической прочности промежутка «стержень-плоскость» длиной s : 1-50% разрядное напряжение, $t_{\phi}=450\text{мкс}$, $t_{np} > t_{\phi}$; 2-разрядное напряжение U_p^{\min} , рассчитанное по [10], $t_{\phi}=m_{кр}=t_{np}$; 3-50% разрядное напряжение при $t_{\phi}=250\text{мкс}$, $t_{np} > t_{\phi}$; 4-100% разрядное напряжение, $t_{\phi}=250\text{мкс}$, $t_{np} > t_{\phi}$; 5-100% разрядное напряжение, $t_{\phi}=250\text{мкс}$ ($T_{\phi}=t_{np}$).

В данной работе представлены результаты исследований по уточнению влияния формы коммутационного импульса на характер развития разряда в длинных воздушных промежутках с целью испытания молниезащитных устройств.

Исследования проводились с использованием генератора импульсных напряжений фирмы TUR на 6 МВ и энергией 960 кДж. Длительность фронта импульса варьировалась в пределах от 2,5 до 450 мкс, длина воздушного промежутка – от 6 до 25 м. Разряд формировался между высоковольтным электродом в виде стержня длиной 2 м (диаметром 46 м) и поверхностью земли. Длительность импульса составляла $t_{u0,5}=2500\text{мкс}$.

Таблица

Разрядное напряжение U_p и средняя разрядная напряженность E_{np}^{cp} длинных воздушных промежутков на импульсах положительной полярности длительностью $t_{u0,5}=2500\text{мкс}$

№ п/п	S , м	t_{ϕ} , мкс	$T_{кр}$, мкс	t_{np} , мкс	U_p 50%, кВ	E_{np}^{cp} , кВ/м
1	2	3	4	5	6	7
1	6	250	260	180	1960	327
2	7	250	295	220-300	2050	293
3	8	250	330	280	2100	262
4	8	$2,5 t_{u0,5}=50$	-	3	3580	448
5	10	250	400	460-480	2112	211
6	10	450	400	520-600	1750	175
7	10 [7]	3000	400	?	2100	210
8	15	250	525	620-700	2650	176
9	25	250	1250	≈ 1300	>3400	136

Типовая форма разрядов в промежутке длиной 15 м приведена на рис.1.

Результаты исследования пробоя длинных воздушных промежутков приведены в таблице и на рис. 2.

При уменьшении длительности фронта импульса с 450 до 250 мкс пробивное

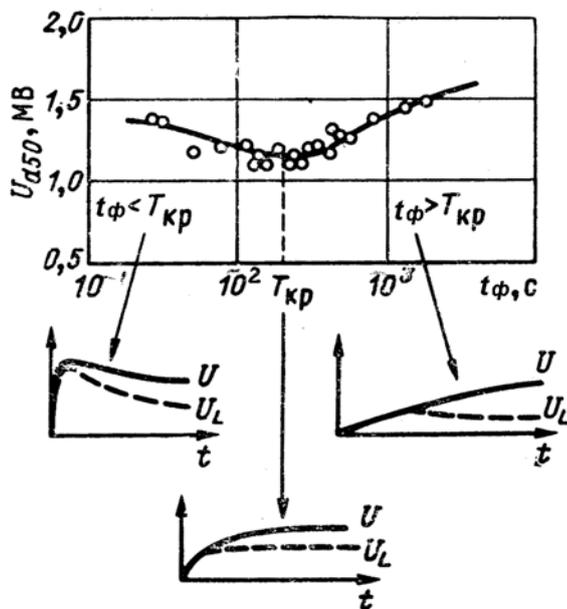


Рис. 3. Влияние времени нарастания импульса напряжения t_ϕ на разрядное напряжение промежутка «стержень-плоскость» [10] (при падающем u_1 имеет место ступенчато развивающийся лидер).

увеличению пробивного напряжения (см. рис.3). Например, при $t_\phi=250\text{мкс}$ и при $t_\phi=3000\text{мкс}$, пробивное напряжение промежутка длиной $S=10\text{м}$ составляет $U_p \approx 2100\text{кВ}$ (см. поз. 4, 6 табл.). При этом сохраняется случайный (вероятностный характер) и ступенчатое развитие канала разряда.

Поэтому испытания молниезащитных устройств могут проводиться на стандартном коммутационном импульсе напряжения 250/2500мкс в воздушных промежутках длиной $S=10\text{-}15\text{м}$ (см. поз. 5,8 табл.), при средней разрядной напряженности $E_{np}^{cp}=210\text{-}176\text{кВ/м}$.

Среднестатистическое время пробоя составляет $t_{np} \approx 450\text{-}650\text{мкс}$, а завершение пробоя происходит практически на максимуме амплитуды приложенного напряжения.

Литература: 1. IEC 61024-1-1/ Protection of structure against lightning. Part 1. General principles. Section 1: Guide A – Selection of protection levels for lightning protection systems. 1993. 2. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. РД 34.21.122-87 /Минэнерго СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 56с.3. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений и промышленных коммуникаций. -М: Издательство МЭИ, 2004. -57с.4. Акопян А.А. Исследование защитного действия молниеотводов. «Труды ВЭИ», вып.36, 1940г. – с.94-158. 5. Александров Г.Н. и др. К вопросу об оценке защитного действия молниеотводов. Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 1970, №3.- с.48-54. 6. Александров Г.Н., Иванов В.Л. Базелян Э.М., Садыхова Е.А. Об ориентировке канала длинной искры, журнал Электричество, №3, 1973г. – с.63-66. 7. Базелян Э.М. и др. Физические и инженерные основы молниезащиты. Л.: Гидрометеиздат, 1978г. – 223с. 8. Александров Г.Н., Кадзов Г.Д. О повышении эффективности молниезащиты, журнал Электричество, №2, 1987г. – с.57-60. 9. Базелян Э.М. Зоны защиты одиночных стержневых молниеотводов, журнал Электричество, №7, 1967г. – с.64-69. 10. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения: Пер. с нем./ М.Бейер, В. Бек, К. Меллер, В. Цаенгль; Под ред. В.П. Ларионова.-М.: Энергоатомиздат, 1989.-555с.

напряжение существенно увеличивается (см. кривые 1,3 рис. 2). Это можно объяснить тем, что $t_\phi=450\text{мкс}$ ближе к критическому времени $T_{кр}$ пробоя воздушных промежутков длиной $S=8\text{-}15\text{м}$, которое может быть определено по формуле: $T_{кр}=(35S+50)$, мкс, для минимальной разрядной напряженности $U_p^{\min}=\frac{3,4}{1+8/S}$, МВ [10].

При равенстве критического времени пробоя $T_{кр}$ и длительности фронта нарастания импульса t_ϕ разрядная напряженность имеет минимальное значение, рис. 3. Однако при этом ступенчатого развития канала лидера не наблюдается [10].

Уменьшение или увеличение длительности фронта импульса относительно критического времени пробоя $T_{кр}$ приводит к

МНОГОКАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПИТАНИЯ ПЛАЗМЕННОГО КАТОДА

Юферов В.Б., докт. техн. наук, Ткачев В.И., Буравилов И.В., Пономарев А.Н., Ковтун Ю.В., Винников Д.В., Друй О.С., Скибенко Е.И. (г.Харьков, Украина)

The experiments on development of the plasma pulse cathode and plasma mirror with large simulation surface has been carried out. The above devices were triggered by the multichannel power supply system.

В ряде задач необходима одновременная или параллельная работа генераторов импульсных токов (ГИТ). Такого рода задачи возникают, например, при работе плазменных коммутаторов тока [1, 2] или при создании плазменных катодов большой площади, или плазменных зеркал [3]. В таких случаях обычно используют схемы синхронизации, однако, когда допустим некоторый разброс времен срабатывания, систему можно упростить. В плазменных коммутаторах тока такие разбросы допустимы в области десятков и даже сотен нс. При длительности существования плазменных зеркал или плазменных катодов, в десятки мкс, разброс также может быть достаточно велик. При одной системе питания (ГИТ) не удастся сделать равномерным разряд достаточной протяженности или большой площади. Работа одной системы питания на два и более параллельных электродов не дает равномерных по плотности каналов. Как правило, их не более 3-4-х, при этом не покрывается вся площадь. Плотность в таком зазоре также не одинакова. В качестве модели плазменного зеркала выбрана вакуумируемая полость с площадью поверхности около ста квадратных сантиметров при ширине зазора в 3-4 мм, рисунок 1,а. При развитии разряда в зазоре между двумя изоляционными поверхностями в 3-5мм ширина разряда может достигать 10-15мм.

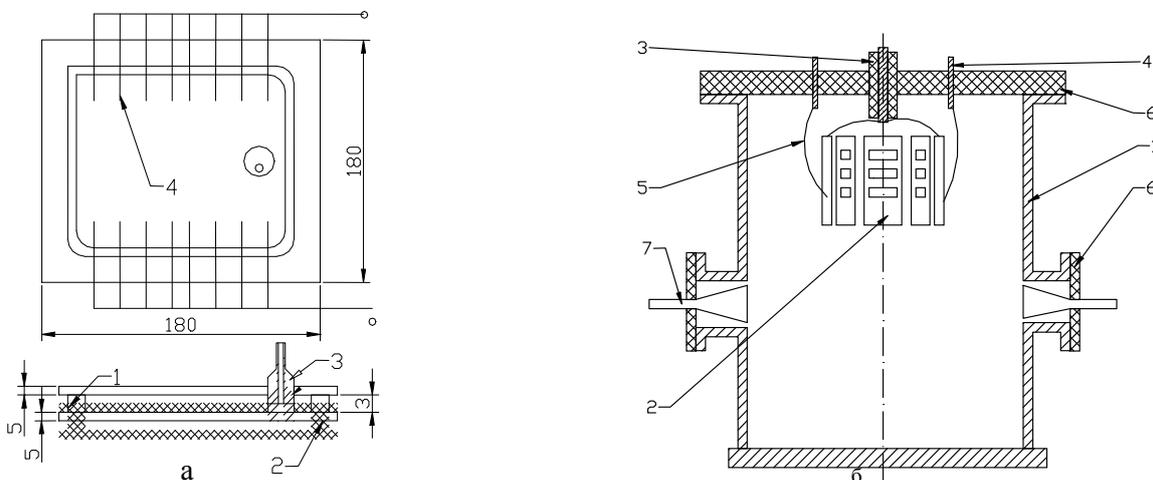


Рис. 1. а. Плазменное зеркало планарного типа: 1 – диэлектрик; 2 – уплотнитель; 3 – земляной электрод-откачной канал; 4 – высоковольтный электрод; б.-Цилиндрический плазменный катод: 1 – вакуумная камера; 2 – плазменный катод; 3 – земляной электрод; 4 – высоковольтный электрод; 5 – токоподводы; 6 – фланец; 7 – СВЧ-рупора для диагностики.

Таким образом была создана разрядная ячейка $100 \times 100 \text{ мм}^2$, с зазором между пластинами в 4-5мм и 8 парами противоположащих разрядных электродов. При наборе системы плазменного зеркала из системы параллельных разрядов допустимы некоторые вариации плотности плазмы при условии, что минимальная плотность плазмы выше, чем критическая плотность отсечки микроволнового сигнала, $N \geq N_c$. Вид плазменных катодов представлен на рисунке 1,б. здесь также есть некоторая азимутальная неоднородность плотности, что дает некоторую неоднородность эмиссион-

ных токов. Однако, в процессе временной выдержки эти неоднородности плотности плазмы уменьшаются за счет диффузионных процессов. Электроды параллельных разрядных цепей находятся в условиях прямой видимости, за счет УФ-подсветки развитие разрядов будет происходить с временным разбросом наносекундного диапазона времен, что вполне удовлетворяет условия нашей задачи.

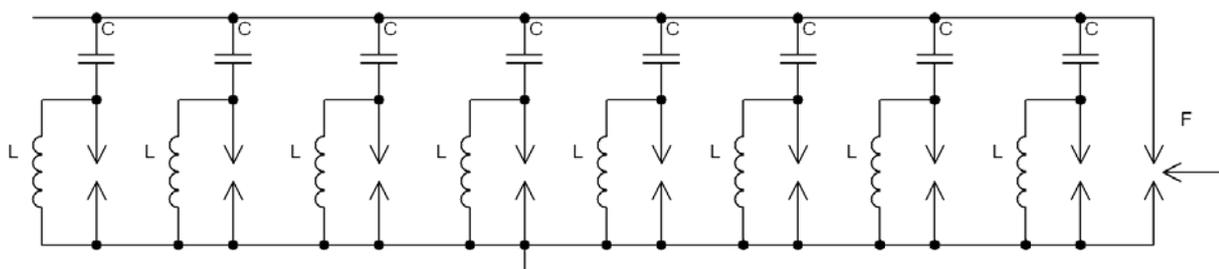


Рис. 2. Электрическая схема включения электродов в разрядный контур.

Плазменный катод имел цилиндрическую форму позволяющую формировать эмитирующую поверхность на различном расстоянии от разрядного промежутка. Состоял он из восьми четырехэлектродных плазменных пушек планарного типа, расположенных касательно воображаемой цилиндрической поверхности. Плазма создавалась с помощью одновременного разряда восьми четырехзачорных плазменных пушек.

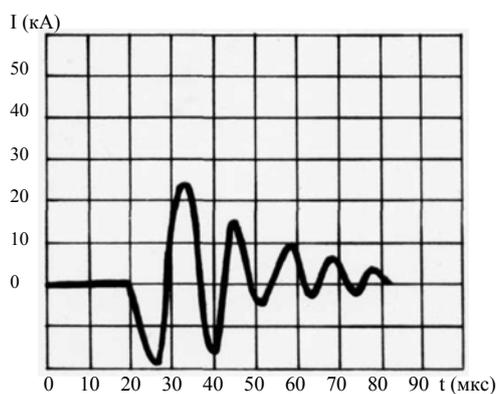


Рис 3. Суммарный разрядный ток.

При необходимости их количество для увеличения площади эмитирующей поверхности может быть увеличена многократно. Разряд происходит по поверхности диэлектрика – в данном случае оргстекла.

Для обеспечения одновременного срабатывания всех восьми электродов, они соединялись в разрядный контур по схеме, показанной на рис.2. Особенность схемы состоит в том, что для каждого электрода использовался отдельный конденсатор ($C \approx 0,4$ мкФ, $U \leq 20$ кВ), но разряд конденсаторов через электроды коммутировался через общий разрядник. Такая схема включения позволила избавиться от проблем, связанных с синхронизацией срабатывания электродов. При подаче запускающего импульса на разрядник конденсаторы, предварительно заряженные до одинакового напряжения разряжаются через свой электрод. Суммарный ток в пушках

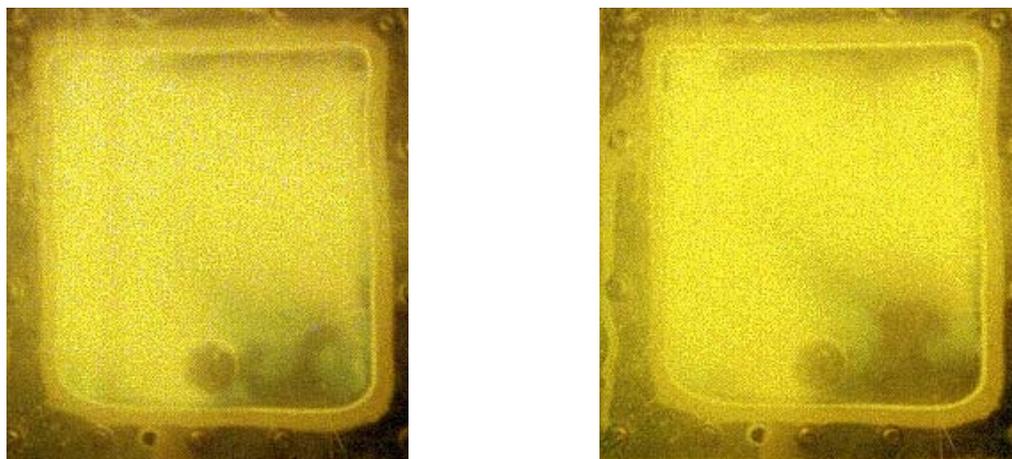


Рис 4. Фото плазменного зеркала.

составлял 25...50 кА, длительность импульса около 10 мкс, рис. 3. Индуктивность разрядного контура составила около Гн. $5 \cdot 10^{-6}$ Гн. Габаритные размеры цилиндрического плазменного устройства следующие: диаметр 150 мм, высота 300 мм. Отметим, что в принципе в цилиндрическом случае эмитирующей может быть и внутренняя, и внешняя поверхность цилиндра. Плазменный поток, образовавшийся в разрядном промежутке "плазменная пушка – земляной электрод", вытекал в нижнюю часть вакуумной камеры. площадь эмитирующей поверхности может быть практически неограниченной, т.е. величины токов могут достигать по положительной компоненте 10^4 А, а по отрицательной $10^6 \dots 10^7$ А. На рис 4 приведено фото плазменного зеркала. Как видно, засветка его плоскости достаточно равномерна почти по всему полю. Неоднородность наблюдается вблизи металлического ввода, находящегося при плавающем потенциале и обеспечивающего вакуумную откачку разрядного зазора. Как не эмитирующий электрод, он создает эффект "тени". Неоднородность плазмы, создающаяся благодаря его влиянию может быть устранена.

Выводы: Создана и испытана многоканальная система питания плазменных катодов и плазменного зеркала. Ее применение дало положительный результат. На базе многоканальной системы проведены испытания плоского плазменного зеркала, а также различных модификации плазменных катодов планарного и объемного типов.

Литература: 1. Юферов В.Б., Друй О.С., Артюх В.Г., Малец В.Ф. "Малогабаритный, сверхмощный импульсный электронный ускоритель с СВЧ-генератором для облучения - ДИН-2К". ВАНТ серия Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение, вып. 1(67), 2(68), 1998 г.- 173–174с. 2. Skibenko E.I., Yuferov V.B., Artyukh V.G. The small-size electron accelerator "DI" with high-performance plasma current switch. Problems of Atomic Science and Technology, Series: Plasma Physics, issues 3(3), 4(4), Kharkov, 1999, -236p. 3. Юферов В.Б., Скибенко Е.И., Сороковой Л.Г., Рыбалко А.Н., Ткачев В.И., Косик Н.А., Буравиллов И.В., Пономарев А.Н., Лукин К.А., Онищенко И.Н. "Импульсный плазменный катод с большой эмитирующей поверхностью", ВАНТ серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения (3), № 4, 2003 г. -319-322с.

УДК 621.314

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ СОВМЕСТИМОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ ГИТ ПОГРУЖНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПРИЗАБОЙНЫХ ЗОН НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

Курашко Ю.И., канд. техн. наук, **Хвощан О.В.** (г. Николаев, Украина)

By mathematical modelling distribution of a potential difference along the case electrodischarge submersible device for processing oil wells is investigated. Distribution determines electromagnetic compatibility of the equipment placed in installation.

Одним из вопросов, возникающих при разработке и эксплуатации погружного электроразрядного оборудования для обработки скважин, является проблема обеспечения электромагнитной совместимости оборудования [1-3]. При работе установок в разрядном контуре протекает ток с амплитудным значением до 15 кА и длительностью первой полуволны до 15 мкс. Переменный ток такой величины генерирует в окружающем пространстве сильное импульсное электромагнитное поле. В погружной части установки для обработки нефтяных скважин в одном корпусе размещаются как разрядный контур, так и зарядный блок, в состав которого входят схемы контроля качества разряда, при этом возрастает опасность воздействия помех на слаботочные цепи.

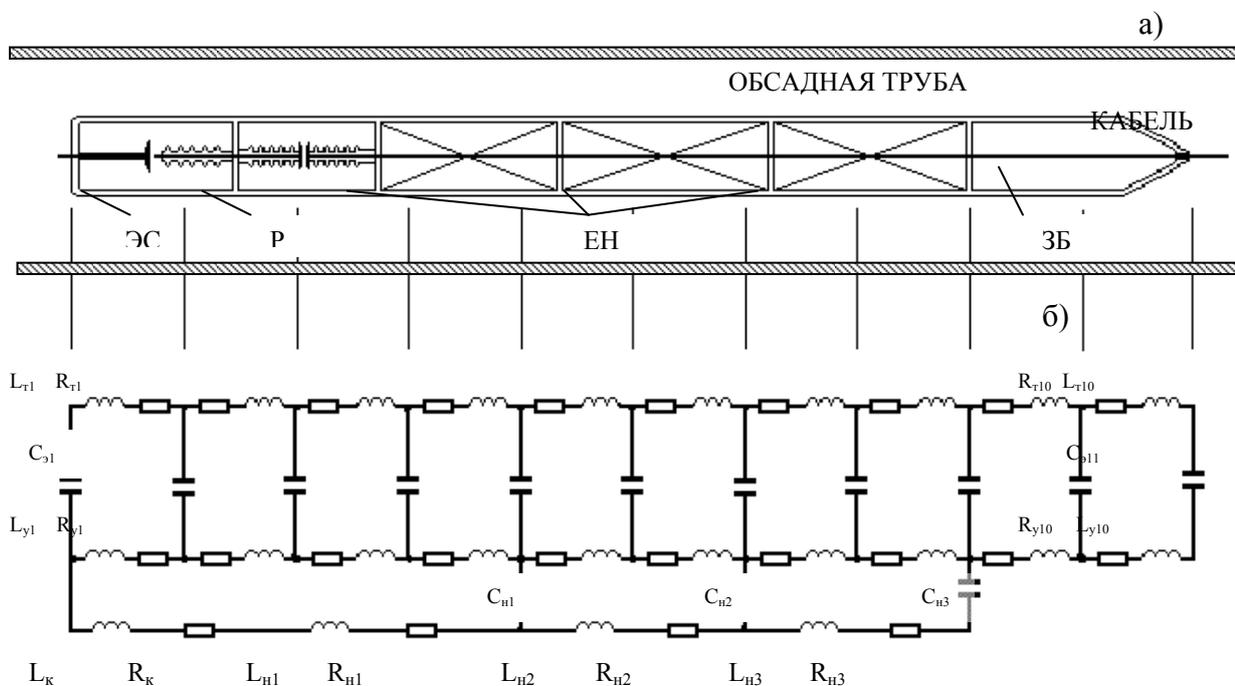


Рис. 1. Схема размещения погружной части установки в скважине (а) и электрическая схема замещения системы погружная часть установки – обсадная труба (б): L_{yi}, R_{yi} – индуктивности и активные сопротивления участков корпуса установки; L_{mi}, R_{mi} – индуктивности и активные сопротивления участков обсадной трубы; C_{zi} – емкость участков ВНЭ; L_k, R_k – индуктивность и активное сопротивление части разрядного контура (без накопителей); L_{ni}, R_{ni} – индуктивность и активное сопротивление накопителей; ЭС – электродная система; Р – разрядник; ЕН – емкостной накопитель; ЗБ – зарядный блок.

Ранее [4] был проведен анализ уровня наводок, возникающих при работе погружной скважинной установки для обработки артезианских скважин. Целью настоящей работы является определение количественного уровня высоковольтных наводок, возникающих при работе погружной скважинной установки для обработки нефтяных скважин.

Постановка задачи исследования сводится к следующему. В рабочем положении погружная часть установки опущена в стальную обсадную трубу, заполненную водонефтяной эмульсией (ВНЭ) (рис. 1). Сама установка представляет собой коаксиальную конструкцию, в которой разрядный контур образован высоковольтными импульсными конденсаторами, газонаполненным разрядником и электродной системой. При этом часть стального корпуса установки является обратным токопроводом, по которому замыкается ток в разрядном контуре.

В случае работы установки в ВНЭ при низких (до 20%) значениях обводненности токов проводимости не возникает, а распределение потенциала на обсадной трубе обусловлено наличием токов смещения в жидкости, обладающей близкими к диэлектрическим свойствами. Кроме того, установка для обработки нефтяных скважин содержит 3 высоковольтных конденсатора, соединенных параллельно и обладающих конечными сопротивлением и индуктивностью.

Потенциал корпуса в процессе разряда будет существенно выше нуля, и изменяться во времени в соответствии с изменением величины разрядного тока. Ток замыкается не только по корпусу, но и через емкость (1) по обсадной трубе.

$$C_{zi} = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{R_2}{R_1}}, \quad (1)$$

где ε - диэлектрическая проницаемость среды между электродами; l_i - длина участка трубы; R_1 - радиус корпуса; R_2 - радиус обсадной трубы.

Знание распределения изменяющегося в течение разряда электрического потенциала на поверхности корпуса установки позволяет оценить уровень помех, возникающих при работе установки.

Задача исследования заключается в нахождении распределения электрического потенциала в объеме скважины, ограниченном стенками обсадной трубы, в которую погружена разрядно-импульсная установка. Математический анализ схемы проводился с помощью пакета программ для проектирования электрических схем OrCAD версии 9.2, в состав которого входит программа для моделирования переходных процессов PSpice.

Электрическая схема замещения рассматриваемой системы обсадная труба - ВНЭ - установка имеет вид, представленный на рис. 1б. При построении схемы замещения вся расчетная область по длине разбивалась на участки, количество которых определялось необходимой точностью расчета. На схеме обозначены сопротивления и индуктивности участков корпуса установки и обсадной трубы

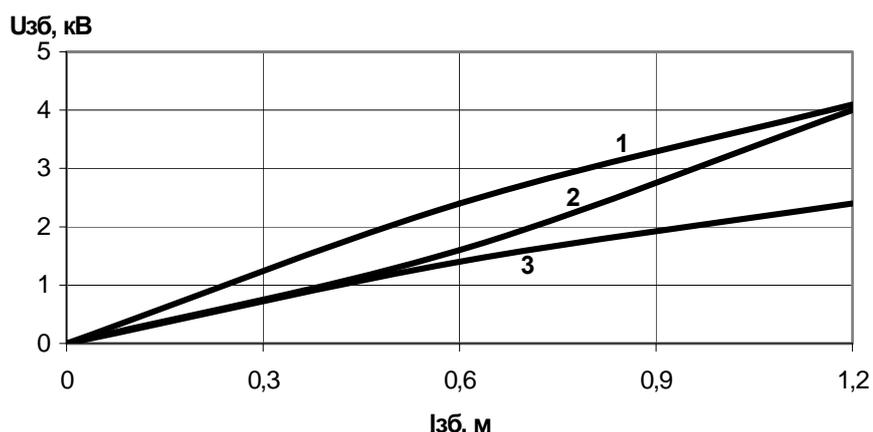


Рис. 2. Распределение разности потенциалов вдоль корпуса зарядного блока погружной части установки для обработки нефтяных скважин: 1 - нет касания корпуса и обсадной трубы; 2 - корпус и обсадная труба касаются в области ЗБ; 3 - корпус и обсадная труба касаются в области ЭС.

(определялись по погонным значениям), емкости промежутков. Погонные сопротивления корпуса и трубы рассчитывались с учетом скинирования тока [5].

Результаты расчета распределения разности потенциалов в области корпуса зарядного блока установки в момент максимума тока разряда представлены на рис. 2. Учитывая, что положение установки в скважине может быть не строго вертикальным, один из концов погружной части установки будет касаться трубы. Как видно из рис. 2, при работе установки на корпусе зарядного блока возникают импульсные перенапряжения величиной порядка 4 кВ, что может привести к проникновению помехи внутрь устройства и нарушению нормальной эксплуатации. Кроме того, соединение корпуса установки с броней соединительного кабеля приводит к появлению перенапряжений в изоляции кабеля. Полученные количественные оценки электромагнитных помех указывают на необходимость решения вопросов защиты, в первую очередь, низковольтных цепей контроля от возникающих в процессе разряда импульсных помех.

Литература: 1. Г.Я. Вагин, Б.П. Борисов. Электромагнитная совместимость электротехнологических установок и питающих сетей.// Техническая электродинамика. - 1986. - №2. - С.35-39. 2. Барнс Дж. Электронное конструирование: методы борьбы с помехами. - М.: Мир, 1990. - 238 с. 3. Л.У. Рикетс, Дж.Э. Бриджес, Дж. Майлетта. Электромагнитный импульс методы защиты. - М.: Атомиздат, 1979. - 325 с. 4. Дубовенко К.В., Курашко Ю.И., Климанский Н.Н. и др. Исследование процессов, влияющих на электромагнитную совместимость оборудования ГИТ погружных уста-

УДК 530.145

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ В КОАКСИАЛЬНОМ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЕ.

Коробко А.И., канд.техн.наук, Коробко З.И. (г. Харьков, Украина)

The mathematical model of behaviour of a dielectric drop taking place in liquid dielectric under influence of an electrostatic field of coaxial system of electrodes of electrofilter system of clearing of non-conducting oils is resulted.

Проблема очистки различных масел актуальна до настоящего времени из-за необходимости вторично использования их в различных технологических процессах. При проектировании камеры для электроочистки масла возникла необходимость рассмотреть движение диэлектрической капли (относительная диэлектрическая проницаемость капли ϵ) в жидком диэлектрике (относительная диэлектрическая проницаемость среды ϵ_{cp}) в электрическом поле, созданном электродами, имеющими вид двух коаксиальных цилиндров конечной длины.

Задача движения конечных частиц в электрических полях относится к задачам электродинамики сплошных сред. Решения различных задач такого типа рассмотрены в [1], где даны решения для диэлектрической сферы в однородном электрическом поле с учетом деформации сферы при движении и без нее. В [2] рассмотрен случай диэлектрической сферы в поле точечного заряда, а в [3] - диэлектрическая сфера в поле сферического заряда с конечным радиусом. В нашем случае учитывается конечность размеров источника поля и вязкость диэлектрика среды, соответствующие характеристикам реальной системы электроочистки масла.

При решении задачи сделаны следующие допущения:

- плотности диэлектрической среды и капли одинаковы (для исключения воздействия гравитационных сил и сил инерции);
- диэлектрическая капля имеет вид недеформируемого шара;
- заряд на электродах распределен равномерно;
- аксиальный поток жидкости в системе электродов ламинарный.

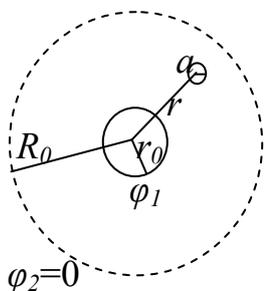


Рис. 1. Поперечное сечение системы электродов.

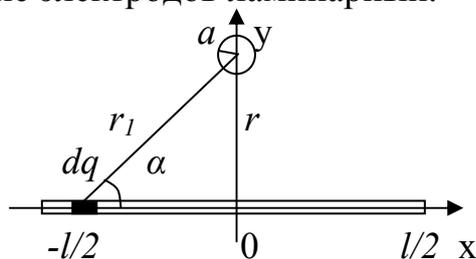


Рис.2. Продольное сечение системы электродов.

На рис.1 и рис.2 сечения проходят через центр диэлектрической капли, a - радиус капли, R_0 - радиус внешнего электрода, r_0 - радиус внутреннего электрода, l - длина электродов.

В электрическом поле диэлектрическая капля приобретет дипольный момент \vec{p} , а потенциальная энергия взаимодействия диполя с электрическим полем определяется как $U = -(\vec{p}\vec{E})$, где \vec{E} - напряженность электрического поля. Дипольный момент капли $\vec{p} = \varepsilon_0\alpha\vec{E}$, где α - коэффициент поляризуемости диэлектрика капли, который мы определяем из уравнения Клаузиуса-Мосотти.

Разобьем внутренний электрод на элементарные заряды, считая их точечными, а поле от такого заряда будем рассматривать как элементарное:

$$d\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_{cp}r_1^2} \cdot \frac{\vec{r}_1}{r_1} dq,$$

элементарный заряд равен $dq = (q/l)dx$,

где $q = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_{cp}l}{\ln\frac{R_0}{r_0}}\Delta\varphi$, $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, при условии, что потенциал второго электрода

равен нулю.

Суммируя по всему электроду, получаем выражение для напряженности, а силу, действующую на каплю, определим из выражения: $\vec{F} = -gradU$.

После преобразований выражение для силы имеет вид:

$$F = -\frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_{cp}l^2\Delta\varphi^2}{(\ln\frac{R_0}{r_0})^2} \cdot \frac{\varepsilon - \varepsilon_{cp}}{\varepsilon + 2\varepsilon_{cp}} \cdot \frac{a^3(2r^2 + \frac{l^2}{4})}{r^3(\frac{l^2}{4} + r^2)^2}.$$

При движении диэлектрической капли на нее со стороны вязкой среды, в которой она находится, будет действовать сила сопротивления \vec{F}_{cm} (сила Стокса) [4], которую испытывает твердый шар при его поступательном движении в вязкой жидкости:

$$\vec{F}_c = -6\pi\eta a\vec{v},$$

где η - коэффициент динамической вязкости жидкости, a - радиус капли, \vec{v} - скорость капли. Это выражение справедливо лишь для малых чисел Рейнольдса.

Следовательно, мы можем составить скалярное уравнение движения капли: $m\ddot{r} = -F_r + F_{cm}$,

$$m\ddot{r} - 6\pi\eta a\dot{r} = -\frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_{cp}l^2\Delta\varphi^2(\varepsilon - \varepsilon_{cp})a^3(2r^2 + \frac{l^2}{4})}{(\ln\frac{R_0}{r_0})^2(\varepsilon + 2\varepsilon_{cp})r^3(\frac{l^2}{4} + r^2)^2}. \quad (1)$$

Проанализируем полученное уравнение. Капля из неполярного диэлектрика (ε) в диэлектрической среде (ε_{cp}) будет «втягиваться» в область с большей напряженностью, если $\varepsilon > \varepsilon_{cp}$ и «выталкиваться» из этой области, если $\varepsilon < \varepsilon_{cp}$. Поэтому диэлектрические частицы с $\varepsilon > \varepsilon_{cp}$ будут оседать на внутреннем электроде, а капли из вещества с $\varepsilon < \varepsilon_{cp}$ будут оседать на внешнем электроде.

Численный анализ величин сил, действующих на каплю был проведен для различных значений радиуса диэлектрической капли, движущейся в трансформа-

торном масле для кинематической вязкости равной 30 сст [5], для напряжения между электродами равного 10 кВ, отношения радиусов внешнего и внутреннего электродов равного 200, длины электродов 10 см. При этом разница в величинах диэлектрической проницаемости масла ($\varepsilon_{cp} = 2,24$) и капли из бензола ($\varepsilon = 2,28$) [4] была взята минимальной. Результаты анализа проведены в таблице.

		$a=0,25$ мкм	$a=10$ мкм	$a=50$ мкм
Сила притяжения, Н	$r=0,95R_0$	$8,37 \cdot 10^{-11}$	$3,35 \cdot 10^{-9}$	$1,67 \cdot 10^{-8}$
	$r=0,5R_0$	$5,57 \cdot 10^{-10}$	$2,30 \cdot 10^{-8}$	$1,15 \cdot 10^{-7}$
	$R=0,01R_0$	$7,17 \cdot 10^{-5}$	$2,87 \cdot 10^{-3}$	$1,43 \cdot 10^{-2}$
Сила Стокса, Н	$v=5 \cdot 10^{-4}-2,5 \cdot 10^{-2}$, м/с	$6,23 \cdot 10^{-7}$ $-3,1 \cdot 10^{-4}$	$2,49 \cdot 10^{-5}$ – $1,24 \cdot 10^{-2s}$	$1,25 \cdot 10^{-4}$ – $6,23 \cdot 10^{-2}$

Как видно из приведенных данных можно ожидать эффективной очистки трансформаторного масла от капель бензола размером 0,25 мкм и выше.

Полученное уравнение (1), описывающее поведение частицы, не решается в аналитическом виде. Поэтому с помощью пакета прикладных программ Matlab 6.5 были получены совокупности численных решений, описывающие поведение частиц при различных начальных условиях, что позволило подойти к проектированию и успешному испытанию электрофильтра (статья данного сборника Коробко А.И. «Эффективная электрофильтровая система очистки трансформаторного масла») с достаточным пониманием.

Литература: 1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. - М.: Наука, 1982. - с.13-97. 2. Батыгин В.В., Топтыгин И.Н. Сборник задач по электродинамике. -М.: Наука, 1970. - 498с. 3. Кронин Дж., Гринберг Д., Телегди В. Сборник задач по физике с решениями. - М.: Атомиздат, 1975. - 156с. 4. Кухлинг Х. Справочник по физике. - М.: Мир, 1982. - 519с. 5. Александров Г.Н., Иванов В.Л. и др. Техника высоких напряжений. -М.: Высшая школа, 1973. - 527с.

УДК 530.145

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ПРОВОДЯЩЕЙ ЧАСТИЦЫ В КООКСИАЛЬНОМ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЕ

Коробко А.И., канд. техн. наук, **Коробко З.И.** (г. Харьков, Украина)

The mathematical model of behaviour of the conducting particle which are taking place in a dielectric liquid and action of an electrostatic field in coaxial system of electrodes of the final sizes of system electrostatic clearing of non-conducting liquids is resulted.

При рассмотрении задач электроочистки масел возникает необходимость анализа движения проводящей капли в диэлектрической среде в поле, созданной системой двух электродов конечной длины в виде коаксиальных цилиндров.

Задачи движения проводящего тела конечных размеров в электростатическом поле рассмотрены, например в [1,2], где подробно анализируется движение частиц конечных размеров в однородных электрических полях без учета деформации частицы и с учетом деформации. В [3] показан способ решения подобных задач с помощью разложения потенциала поля по мультипольным моментам, но для случаев полей, созданных точечным зарядом или бесконечно тонкой нитью. Нами рассмотрена реальная очистительная камера коаксиального типа конечных размеров.

На рис.1 и рис.2 приведены поперечное и, соответственно, продольное сечения системы, проходящее через центр шара в виде проводящей капли. При решении задачи сделаны следующие допущения:

- плотности диэлектрической среды и капли одинаковы (иначе возможно движение капли под воздействием гравитационных сил и сил инерции);
- капля – недеформируемый шар;
- заряд на внутреннем и внешнем электродах коаксиальной системы равномерно распределен как по длине системы, так и по окружностям электродов;
- проводящая частица изначально не заряжена;
- аксиальный поток жидкости в системе электродов ламинарен.

$$\varphi_2=0$$

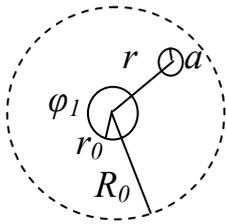


Рис. 1. Поперечное сечение системы электродов.

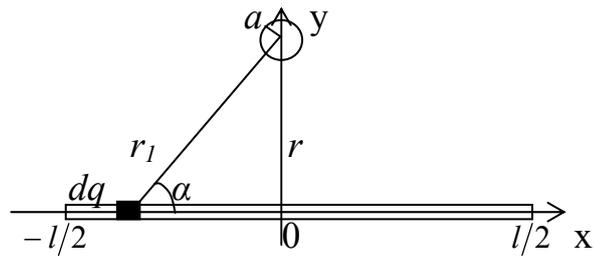


Рис.2. Продольное сечение системы электродов.

На проводящей частице будет наведен эквивалентный заряд, а сила, действующая на него в электрическом поле, определяется как: $\vec{F} = q_a \vec{E}$, где q_a - заряд капли, \vec{E} - напряженность электрического поля.

Разобьем наш внутренний электрод на элементарные заряды и будем считать их точечными, лежащими в секущей плоскости как показано на рис.2. Наведенный на капле заряд от элементарного заряда dq будет иметь вид [2]: $dq_a = adq / r_1$, а эквивалентный заряд, наведенный на капле от всего электрода равен

$$q_a = \frac{qa}{r_1} \ln \frac{\sqrt{\frac{l^2}{4} + r^2} + \frac{l}{2}}{\sqrt{\frac{l^2}{4} + r^2} - \frac{l}{2}}, \text{ где: } dq = \frac{q}{l} dx = \frac{C \Delta \varphi}{l} dx, C = \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon l}{\left(\ln \frac{R_0}{r_0}\right)^2}, q - \text{ заряд внутреннего электрода, } a - \text{ радиус капли, } \varepsilon_0 - \text{ электрическая постоянная, } \varepsilon - \text{ относительная диэлектрическая проницаемость среды, } C - \text{ емкость системы электродов, } \Delta \varphi - \text{ разность потенциалов между электродами, причем потенциал внешнего электрода равен нулю, } l - \text{ длина электродов, } R_0 - \text{ радиус внешнего электрода, } r_0 - \text{ радиус внутреннего электрода.}$$

Сила, действующая на проводящий шар в диэлектрике в коаксиальной электродной системе равна:

$$F = -\frac{q^2 ar}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon l} \ln \frac{\sqrt{l^2 + 4r^2} + l}{\sqrt{l^2 + 4r^2} - l} \int_{-l/2}^{l/2} \frac{dx}{\sqrt{r^2 + x^2}^3} = \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon a l \Delta \varphi^2}{\left(\ln \frac{R_0}{r_0}\right)^2} \cdot \frac{\ln \frac{\sqrt{l^2 + 4r^2} + l}{\sqrt{l^2 + 4r^2} - l}}{r \sqrt{r^2 + \frac{l^2}{4}}}.$$

Но так как наша проводящая капля малых размеров движется в вязкой среде,

то на нее будет действовать сила сопротивления со стороны среды:

$$\vec{F}_c = -6\pi\eta a\vec{v},$$

где \vec{F}_c - сила Стокса, η - коэффициент динамической вязкости, a - радиус капли, \vec{v} - скорость капли.

Получаем уравнение движения капли в скалярной форме, учитывающее направления сил:

$$m\ddot{r} - 6\pi\eta a\dot{r} = -\frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon l\Delta\varphi^2 a}{\left(\ln\frac{R_0}{r_0}\right)^2} \cdot \frac{\ln\frac{\sqrt{l^2 + 4r^2} + l}{\sqrt{l^2 + 4r^2} - l}}{r\sqrt{l^2 + 4r^2}}. \quad (1)$$

Проведем анализ коэффициентов данного уравнения. При любых радиусах проводящей частицы и любых действительных значениях ε_{cp} проводящая частица втягивается в область максимального значения поля.

Приведенные в таблице значения сил, действующих на каплю, рассчитывались для разности потенциалов между электродами 10 кВ, длине электродов 10 см, отношения радиусов внешнего и внутреннего электродов 200, кинематической вязкости 30 сСт [4] и относительной диэлектрической проницаемости среды 2,24 [5].

Из анализа данных, представленных в таблице, следует, что вышеизложенные конструктивные характеристики электродной системы позволяют эффективно производить электроосаждение проводящих частиц размером 0,1 мкм и более.

		$a=0,1$ мкм	$a=2$ мкм	$a=5$ мкм
Сила притяжения, Н	$r = 0,9 R_0$	$1,38 \cdot 10^{-8}$	$2,76 \cdot 10^{-7}$	$6,91 \cdot 10^{-7}$
	$r = 0,5R_0$	$1,31 \cdot 10^{-7}$	$2,62 \cdot 10^{-6}$	$6,55 \cdot 10^{-6}$
	$r = 0,01R_0$	$3,48 \cdot 10^{-4}$	$6,97 \cdot 10^{-3}$	$1,74 \cdot 10^{-2}$
Сила Стокса, Н	$v=5 \cdot 10^{-4} - 2,5 \cdot 10^{-2}$, м/с	$2,49 \cdot 10^{-7} -$ $1,24 \cdot 10^{-5}$	$4,98 \cdot 10^{-6} -$ $2,49 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-5} -$ $6,23 \cdot 10^{-4}$

Отдельно следует также отметить, что мы рассматривали, в рамках наших допущений, случай изначально незаряженной капли. Если проводящая капля имеет начальный заряд Q , то сила, действующая на нее, имеет вид [3]:

$$F_Q = -F + \frac{Qq}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_{cp}a^2},$$

где Q – первоначальный заряд капли.

То есть, если заряды капли и внутреннего электрода одноименны, то сила может стать равной нулю, и такие частицы не будут оседать на электродах, хотя из-за большого заряда на внутреннем электроде такие случаи мало вероятны.

Полученное дифференциальное уравнение (1) описывает математическую модель поведения проводящей частицы в коаксиальной системе электродов конечной длины. Совокупность численных решений этого уравнения для различных начальных условий, полученная с помощью пакета прикладных программ Matlab 6.5 была использована для оптимизации электрических и конструктивных параметров реального электрофильтра, предназначенного для сверхтонкой очистки трансформаторного масла от проводящих частиц в виде воды, сажи (технического углерода) и др.

Высокая эффективность этого электрофильтра, подтвержденная результатами испытаний, изложенными в статье данного сборника: Коробко А.И. «Эффективная электрофильтровая система очистки трансформаторного масла», может служить косвенным доказательством корректности предложенной математической модели.

Литература: 1. Фейнман Р., Лейтон Р., Сендс М. Фейнмановские лекции по физике. Задачи и упражнения с ответами и решениями. - М.: Мир, 1978.-540с. 2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. - М.: Наука, 1982. - с.13-97. 3. Батыгин В.В., Топтыгин И.Н. Сборник задач по электродинамике. -М.: Наука, 1970. - 498с. 4. Александров Г.Н., Иванов В.Л. и др. Техника высоких напряжений. -М.: Высшая школа, 1973. - с.100. 5. Кухлинг. Х. Справочник по физике. - М.: Мир, 1982. - 519с.

УДК 621.928.97

ЭФФЕКТИВНАЯ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВАЯ СИСТЕМА ОЧИСТКИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Коробко А.И., канд. техн. наук, (г. Харьков, Украина)

In paper the brief analysis of existing systems of clearing of dielectric oil is lead, their lacks are resulted. On the basis of mathematical models of behaviour of particles in electrode system of coaxial type the effective system of clearing of oil is developed, created and tested. Results of tests are resulted.

В последнее время существенно возросла потребность в эффективных технологиях очистки и регенерации различных диэлектрических жидкостей на органической основе, применяемых в промышленности, транспорте и электроэнергетике. Это объясняется тем фактом, что нефтяное сырье, как правило, используемое для их производства, непрерывно дорожает, так как оно относится к невозобновляемым полезным ископаемым. По данным [1], сегодня предлагается следующее оборудование очистки технических масел:

- стационарные фильтры с фильтроэлементами глубинного типа (PALL, PARKER, HYDAC, ERPENSTEINER, MANLE, ГП «Фильтротехника» (ОАО РЗТА, г.Ровно), ЧП «ТПК» (г.Киев), УИЦ (г.Челябинск), завод «Прогресс» (г.Бердичев) и др.);
- центрифуги (ALFA LAVAL, Полтавский турбомеханический завод, АООТ НИТИ ТЕСАР (г.Саратов), Новые технологии (г.Москва);
- мобильные фильтрующие системы с вакуумным отделением влаги и газов (PALL, ERPENSTEINER, HYDAC, MICALFIL);
- мобильные промывочные агрегаты (фильтр+насос) (PALL, ERPENSTEINER, HYDAC, MANLE, УИЦ (г.Челябинск));
- мобильные и стационарные установки с применением для удаления влаги цеолита и адсорбента палыгорскита (ООО «Энергетические Технологические Системы» (г.Белгород-Днестровский));
- мобильные установки для полной регенерации трансформаторных масел (с использованием фуллеровой земли в качестве адсорбента);
- мобильные системы электрической очистки масел (МИКРОИНТЕР).

По рекомендациям ISO 4406 для обеспечения надежной работы узлов турбоагрегатов (очистка масла до нормы 15/12 то есть не хуже 13 класса по ГОСТ17216) следует регламентировать содержание частиц размерами 3-25 мкм. Аналогично, по данным харьковского ЦКБ Минэнерго Украины, 1998г., следует регламентировать

содержание частиц размерами 5-20 мкм.

Используемые сегодня для фильтрации масел системы на основе металлических сеток имеют ряд недостатков. Даже сетки с размерами ячейки 20 мкм задерживают частицы загрязнения этих размеров чисто номинально, так как размеры и пространственная ориентация частиц в потоке случайна. Промывка сеток достаточно сложна и требует применения ультразвуковых ванн, моющих средств и очень аккуратной продувки воздухом. Из-за неэффективности промывки в сетках накапливаются мельчайшие частицы, что ограничивает срок службы сеток. Так сетки фирм HYDAC, ERPENSTEINER, MANLE, с размерами фильтруемых частиц 10-25 мкм рекомендуется использовать с промывкой не более 8 раз.

Применение центрифуг, как правило, не обеспечивает удаление частиц размерами 5 мкм и менее. Использование для очистки и полной регенерации масла адсорбента типа фуллерова земля ограничено тем, что он поглощает из масла ингибитор.

Цеолит, после его неоднократной регенерации, имеет свойство крошиться, сам является мощным источником пыли.

Электроочистка является перспективным, эффективным и быстроразвивающимся направлением. Такие системы в отличие от механических фильтроэлементов с разной эффективностью удаляют частицы различной физической природы, т.к. эти частицы обладают различной диэлектрической проницаемостью и проводимостью. В то же время существующие электрофильтры по своей сути являются системами для финишной (сверхтонкой) очистки масел, т.к. требуют предварительной очистки другими методами.

Целью данной работы является повышение эффективности электрофильтровых систем очистки масел.

Решение данной задачи проводилось следующим образом:

- математическое моделирование поведения диэлектрических и проводящих частиц в процессе очистки от них масла (см. следующие статьи данного сборника: 1. Коробко А.И., Коробко З.И. «Математическая модель поведения диэлектрической частицы в коаксиальном электрофильтре». 2. Коробко А.И., Коробко З.И. «Математическая модель поведения проводящей частицы в коаксиальном электрофильтре»);
- оптимизация конструкции электрофильтра и его испытания.

При этом к разрабатываемому электрофильтру были предъявлены следующие требования:

- максимальная степень очистки трансформаторного масла от инородных частиц размером 5-40 мкм;
- максимальное расширение технических возможностей электрофильтра в части эффективной очистки сильно обводненных, сильно загрязненных и «старых» масел без применения систем предварительной очистки.

На основе результатов математического моделирования процессов осаждения, а также с учетом рекомендаций [2], была выбрана коаксиальная конструкция электродной системы электрофильтра со следующими основными характеристиками.

1. Рабочее напряжение – до 10 кВ.
2. Длина рабочего органа – 330мм.
3. Скорость протока масла по рабочему органу – до 30 мм/сек.
4. Степень неоднородности электрического поля в рабочем органе – 200 : 1.

В процессе испытаний разработанного электрофилтра были обработаны два типа масел. Масло №1 – сильно обводненное (до суспензионного состояния) и сильно загрязненное до потери прозрачности (предварительно загрязнено продуктами распада от действия электрической дуги). Масло №2 – «старое» масло, проработавшее в действующей электроустановке более 15 лет.

Данные испытаний приведены в следующей таблице.

№ масла	Состояние	Кислотность, мг КОН	$\text{tg } \Delta \times 10^4$	U пробивное, кВ
1	До очистки	0,018	18	20
	После очистки	0,020	10	70
2	До очистки	0,056	18	34
	После очистки	0,052	19	70

Из анализа полученных результатов следует, что поставленная задача по разработке высокоэффективного электрофилтра для очистки сильнообводненных, сильнозагрязненных и «старых» масел от частиц размерами 5 – 20 мкм решена, что позволяет использовать результаты для разработки и создания промышленных электрофилтров для очистки трансформаторного масла и других непроводящих жидкостей.

Литература: 1. Гуназа С.А. О совершенствовании эксплуатации энергетических масел. - <http://www.inventors.ru/index.asp?mode=800> 2. Єфендиев О.Ф., Чижиков В.И. Электроочистка жидкостей в пищевой промышленности. - М.: Пищевая промышленность, 1987. – 151с.

УДК 551.594

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОДВИЖЕНИЯ ЛИДЕРА МОЛНИИ

Резинкина М.М., канд. техн. наук, **Князев В.В.**, канд. техн. наук,

Кравченко В.И., докт. техн. наук, (г. Харьков, Украина)

The 3d model of the process of moving of the descending lightning leader has been proposed. He data obtained on the basis of generalization of the known experimental investigations of the processes have been used at the model elaboration.

В настоящее время зоны защиты молниеотводами объектов, высота которых не превышает 150м, определяются согласно требованиям руководящих документов [1]. Однако наличие ряда объектов, например, стартовые ракетные комплексы, нефтехранилища, поражение которых молнией может привести к большим материальным потерям, а также техногенным катастрофам вызывает необходимость разработки моделей, позволяющих более точно оценить вероятность прорыва на них молнии. Такие модели необходимы также при оценке эффективности новых средств молниезащиты.

Вследствие трудностей, с которыми приходится сталкиваться при исследовании молнии в естественных условиях, большая часть работ по данной тематике посвящена математическому и физическому моделированию процессов, сопровождающих развитие молний, например [2-4]. Для решения проблем практической молниезащиты представляется целесообразным разработку вероятностной модели, описывающей процесс продвижения лидерного канала молнии к земле.

Анализ публикаций, касающихся разрядов в длинных воздушных промежутках, например [5-10], позволил сформулировать следующие положения. Согласно [5], притяжение молнии к наземному объекту вызвано его влиянием на распределение электрического поля, то же относится к электрическому полю облака, которое ори-

нтирует лидер, направляя его в среднем вниз, к земле. Механизм действия столь слабых внешних полей ($E_0 \sim 100 \text{ В/см}$) на движение лидера молнии, напряженность поля которого составляет для положительного лидера не менее $E_{кр}^+ = 5 \text{ кВ/см}$ и для отрицательного лидера не менее $E_{кр}^- = 10 \text{ кВ/см}$, объясняется там же следующим образом. Скорость лидера определяется разностью потенциалов лидерной головки U_h и внешнего поля U_0 в месте ее нахождения. Огромный перепад $\varphi U = |U_h - U_0| \sim 10-100 \text{ МВ}$ на сравнительно короткой длине стримерной зоны и создает в ней нужное для развития стримеров, а за ними и лидера поле $E_L \approx 5-10 \text{ кВ/см} \gg E_0$. Авторы [5] полагают, что внешнее поле задает лидеру ускорение или замедление. Скорость лидера – это некая функция абсолютной величины перепада напряжения у головки $v_L = f(\Delta U)$, причем, U_0 в выражении для ΔU является функцией радиус-вектора головки \vec{r} . В [5] приведена эмпирическая формула, связывающая скорость лидера v_L и напряжение на его головке

$$v_L \approx a \cdot U_h^{1/2}. \quad (1)$$

Поскольку $U_0 \ll U_h$, было принято, что $\varphi U \approx U_h$ и использована аппроксимация $v_L \sim |\varphi U|^{1/2}$ ($\gamma = 1/2$); в результате получено выражения для ускорения лидера в виде [5]:

$$\frac{dv_L}{dt} = \frac{dv_L}{d\Delta U} \left(-\frac{dU_h}{dt} + \frac{dU_0}{d\vec{r}} \frac{d\vec{r}}{dt} \right) = \gamma \frac{v_L}{\Delta U} \left(-\frac{dU_h}{dt} - \vec{E}_0 \vec{v}_L \right). \quad (2)$$

При мгновенном замыкании на землю линии, которой может быть представлен заряженный канал продвигавшегося к земле лидера, разрядный ток через его замкнутый конец должен также достигать амплитудного значения мгновенно, причем, амплитуда тока не зависит от величины активного сопротивления лидерного канала, а лишь от его волнового сопротивления. В действительности же ток главной стадии нарастает несколько микросекунд, а иногда и десятки микросекунд. Такое сравнительно медленное нарастание тока молнии авторы [5] объясняют свойствами коммутатора, в роли которого выступает стримерная зона нисходящего лидера. В соответствии с данным подходом, скорость нарастания тока и длительность фронта импульса тока у земли определяется процессами не в канале бывшего лидера, а в его исчезающей стримерной зоне. Таким образом, стримерная зона лидера, которая исполняет роль коммутатора, обладает конечным сопротивлением и сокращается в течение конечного времени.

В [6] анализируются процессы развития импульсного пробоя в длинных (до 29 м) промежутках стержень-плоскость при приложении к ним положительного напряжения. Авторы [6] выделяют два основных этапа развития пробоя в длинных промежутках. Первый этап – от момента возникновения короны до соприкосновения внешней границы стримерной зоны лидера с противоположным электродом. На втором (сквозном) этапе развития размеры стримерной зоны сокращаются по мере роста длины канала лидера. При этом плотность стримеров в стримерной зоне, скорости стримеров v_{st} и лидеров v_L , а также разрядный ток i_p растут (примерно на порядок по сравнению с началом данной стадии), а сопротивление стримеров падает.

Погонное сопротивление по длине стримеров составляет порядка 10^{12} Ом/м [7]. Практически это означает, что в процессе пролета стримера по промежутку, длящегося 10-20 мкс, головка канала стримера теряет гальваническую связь с точкой старта. Погонное сопротивление лидера P_L составляет порядка 10 Ом/м [5]. Видимо погонное сопротивление каналов разряда в сквозной фазе P_F представляет собой некоторую

переходную величину между погонными сопротивлениями стримера и лидера.

Согласно [8], при пробое длинных воздушных промежутков длина стримерной зоны примерно равна той высоте, с которой начинается ориентировка лидера на наземный электрод. Причем, это относится как к положительным, так и к отрицательным лидерам. Применим тот же принцип к сверхдлинным искрам – молниям. Полагаем, что последняя ступень движения лидерного канала молнии к земле и расположенным на ней объектам, начинается, когда стримерная зона доходит до них. Причем, последняя ступень представляет собой продвижение в сквозной фазе канала лидера через стримерную зону. Предположим также, что именно с этого момента начинается процесс ориентировки лидера молнии на наземные объекты, в которые впоследствии и ударит молния. Под размером стримерной зоны понимается расстояние от головки лидера, на котором стримеры останавливаются [5,9]. Поскольку при развитии отрицательного лидера наименьшее значение градиента напряжения в стримерной зоне примерно равно $E_L^- = 10 \text{ кВ/см}$, высоту зоны ориентировки, равную начальной длине стримерной зоны в сквозной фазе, запишем как:

$$L_{st0} \sim U_m / E_L^- . \quad (3)$$

Для напряжений молнии $U_m = 10-100 \text{ МВ}$ высота зоны ориентировки составляет 10-100 м, что согласуется с общепринятыми значениями для данной величины [10]. Через участки земли и заземленные объекты, к которым “подключилась” стримерная зона в сквозной фазе, начинает протекать ток:

$$i_F = U_m / (P_F \cdot L_{st} + R_R + R_G), \quad (4)$$

где i_F - разрядный ток в сквозной фазе; P_F - удельное сопротивление каналов стримеров в сквозной фазе; R_R – сопротивление наземной части молниеотвода, R_G - сопротивление растеканию тока в земле, L_{st} - длина стримерной зоны.

Полагаем, что на финальной стадии продвижения молнии к земле имеет место одновременное развитие нескольких конкурирующих лидерных каналов, причем возвратный удар будет происходить по тому из них, который первым достигнет узла с нулевым потенциалом. Поскольку лидеры продвигаются в ионизированной стримерной зоне, а процесс их распространения носит стохастический характер, рассмотрим последовательно все возможные направления распространения лидера. Лидер может иметь различную начальную скорость распространения $v_{L0} = 10^5 - 10^6 \text{ м/с}$ (см., например, [5]) причем, величины L_{st} и v_L определяются уровнем напряжения головки лидера U_m (см. (1), (3)), а значит, взаимосвязаны между собой. Таким образом, задаваясь определенным уровнем U_m , мы имеем определенные значения L_{st} и v_{L0} . Данная задача разделяется на две части: полевую и цепную, и решается на каждом временном шаге. Нулевым моментом времени при моделировании полагается момент начала сквозной фазы, т.е. момент касания стримерной зоной заземленного узла.

Литература: 1. РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. – М.: Энергоатомиздат, 1989. 2. Rezinkina M.M. 24th International Conference of Lightning Protection, Birmingham, U.K., 1998. 3. Дульзон А.А., Лопатин В.В., Носков М.Д. и др. ЖТФ. – 1999. - Т. 69, вып.4. - С. 48-53. 4. Петров Н., Петрова Г. ЖТФ. – 1999. – Т.69, вып.4. – С. 134-137. 5. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. - М.: Физматлит, 2001, 319 с. 6. Горин Б.Н., Шкилев А.В. Электричество. – 1974. - № 2. - С.29-38. 7. Базелян Э.М., Ражанский И.М. Искровой разряд в воздухе. Новосибирск. “Наука”. – 1988. – 164 с. 8. Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты. – Л. Гидрометеоздат, 1978. 223 с. 9. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. УФН. – 2000. - Т. 170. - С.753. 10. Uman M., Rakov V. A American Meteorological Society. - 2002. – December. -P. 1809-1820.

ВЫБОР ЧАСТОТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТОКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Доценко В.И., канд. техн. наук, Колиушко Д.Г., канд. техн. наук, Линк И.Ю.
(г. Харьков, Украина)

The criterion of a choice of the generator current frequency of measuring complex KDZ-1U for definition the substations grounding characteristics in conditions of industrial frequency interferences is established.

Современный комплексный подход к проблеме контроля технического состояния заземляющих устройств (ЗУ) электроустановок в Украине может быть реализован с использованием измерительного комплекса КДЗ-1У [1], который разработан в отделении высоковольтной импульсной техники НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ". Одним из этапов такого контроля является определение основных характеристик ЗУ (сопротивление ЗУ, напряжение прикосновения на оборудовании и др.). Следует отметить, что на погрешность этих измерений существенным образом влияет частота тока генератора, так как частотные характеристики элементов ЗУ зачастую неизвестны. Однако, действующая методика [2] не определяет порядок выбора частоты измерительного тока. В качестве критерия ее выбора рассмотрим одну из систематических составляющих погрешности измерения сопротивления ЗУ. С одной стороны она обусловлена влиянием помех промышленной частоты, которые всегда присутствуют на подстанциях переменного тока, а с другой - отличием частот измерительного тока и тока однофазного замыкания на землю.

Оценим влияние частоты используемого комплекса КДЗ-1У (57 Гц, 211 Гц и 419 Гц) на значение сопротивления ЗУ, измеренное по упомянутой методике, на действующих подстанциях "Ждановка", "Сергеевка" и "Промбаза". Их местоположение позволяет воспользоваться методом амперметра-вольтметра по двухлучевой схеме с выносом токового электрода на 300 м от края ЗУ. Этого расстояния достаточно, так как для подстанций "Ждановка", "Сергеевка" и "Промбаза" диагонали ЗУ составляют 167 м, 136 м и 155 м соответственно. Анализ распределения потенциалов при моделировании протекания тока однофазного замыкания на землю позволяет для этих подстанций установить потенциальный электрод на расстоянии 67 м, 50 м и 70 м соответственно. Сопротивление шунта генератора ГСТ-3, входящего в состав комплекса КДЗ-1У, составляет 1,02 Ом. Частотную погрешность сопротивления ЗУ γ определим как:

$$\gamma = \frac{|U_2 - U_1|}{U_1} 100\%, \quad (1)$$

где U_1 – напряжение на ЗУ при частоте тока генератора 57 Гц; U_2 – напряжение на ЗУ при частоте тока генератора отличной от 57 Гц.

Выражение (1) записано относительно частоты 57 Гц, так как она ближе всего к значению промышленной частоты (50 Гц).

Результаты измерения сопротивления ЗУ в зависимости от частоты тока генератора при неизменном расположении токового и потенциального электродов приведены в табл. 1. Напряжение помехи определялось как напряжение на ЗУ при отключенном генераторе ГСТ-3 комплекса КДЗ-1У.

По данным табл. 1 видно, что результат измерения сопротивления ЗУ подстанций даже незначительных размеров существенно зависит от частоты тока генератора.

Определим уровень напряжения помехи, при котором возникает необходимость

выполнить для частоты тока генератора переход от 57 Гц к 211 Гц или от 211 Гц к 419 Гц. Для этого воспользуемся испытательной установкой, схема которой показана на рис. 1.

Таблица 1

Характеристики	Частота тока генератора на ПС "Ждановка", Гц			Частота тока генератора на ПС "Сергеевка", Гц			Частота тока генератора на ПС "Промбаза", Гц		
	419	211	57	419	211	57	419	211	57
Напряжение шунта генератора, В	0,703	0,705	0,703	0,704	0,701	0,702	0,701	0,701	0,702
Напряжение на ЗУ, В	0,040	0,035	0,032	0,070	0,059	0,051	0,078	0,067	0,051
Напряжение помех, В	0	0	0,003	0	0	0,002	0	0,001	0,018
Сопротивление ЗУ, Ом	0,058	0,051	0,046	0,101	0,086	0,074	0,114	0,098	0,074
Частотная погрешность, %	26,1	10,9	0	36,5	16,2	0	54,1	32,4	0

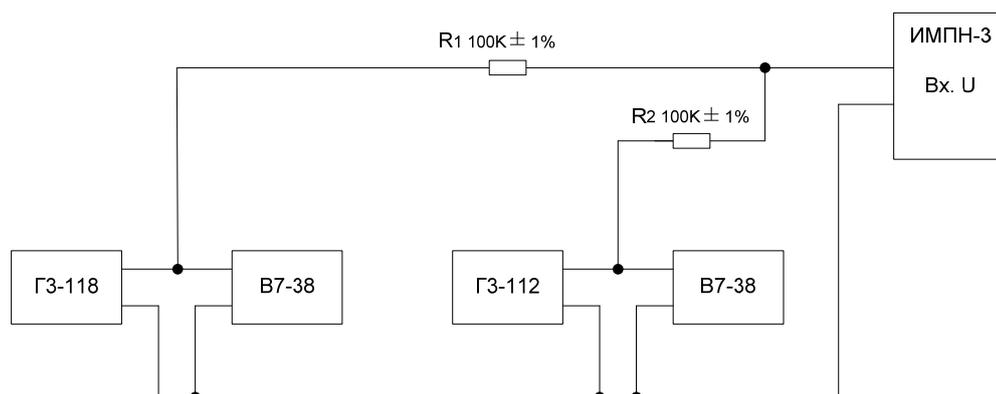


Рис.1. Принципиальная электрическая схема сложения гармонических напряжений разных частот.

При моделировании измерения сопротивления ЗУ в условиях помех генератор ГЗ-118 будет генерировать напряжение U_1 , равное напряжению на ЗУ, создаваемому током генератора ГСТ-3, а генератор ГЗ-112

будет генерировать напряжение U_2 частотой 50 Гц, равное напряжению помехи. Для контроля значений напряжений используем вольтметры В7-38.

Установим на генераторе ГЗ-118 напряжение $U_1=50$ мВ частотой 57Гц. Выполним подстройку частоты напряжения для измерителя ИМПН-3, входящего в комплекс КДЗ-1У. Для этого, путем медленного изменения частоты генератора ГЗ-118, добьемся максимальных показаний ИМПН-3. После подстройки восстановим на генераторе ГЗ-118 напряжение 50 мВ. Установим на генераторе ГЗ-112 частоту 50 Гц. Медленно изменяя напряжение генератора ГЗ-112, добьемся того, чтобы результат измерения суммы $U_1 + U_2$ с помощью измерителя ИМПН-3 составил 55 мВ, что соответствует его предельно допустимой погрешности 10%. Отключим напряжение U_1 и, не изменяя схемы соединений, зафиксируем показания ИМПН-3 – напряжение U_3 .

Отметим, что для тока генератора частотой 57 Гц, 211 Гц и 419Гц в каждом случае измеренное значение U_3 составило 19 мВ. Таким образом, если отношение напряжения U_3 к напряжению $U_1 + U_2$ не превышает 19/55, то погрешность измерения U_1 составит не более 10% для каждой частоты. Иначе, для обеспечения допус-

тимой точности необходимо чтобы выполнялось соотношение:

$$U_1 + U_2 > 3U_3. \quad (2)$$

Выводы: 1. На примере экспериментальных исследований на действующих подстанциях показано, что при измерении сопротивления ЗУ ток генератора частотой 57 Гц обеспечивает минимальную частотную погрешность. 2. При использовании измерительного комплекса КДЗ-1У следует выбирать минимальную частоту тока генератора для которой выполняется условие (2). Если оно не выполняется для частоты 419 Гц, то уровень помех превышает допустимый и характеристики ЗУ нужно определять другим способом (например, расчетным). 3. Действующая в Украине методика измерения сопротивления ЗУ должна быть дополнена в части порядка определения частоты измерительного тока до истечения срока ее пересмотра в 2009 году.

Литература: 1. О.А. Кравченко, Г.П. Кризов. Нові правила випробування та контролю стану заземлювальних пристроїв електроустановок. Електропанорама, №10, 2004, с.56-57, №11, 2004, с.50-51. 2. ГНД 34.20.303-2003 "Випробування та контроль стану заземлювальних пристроїв електроустановок. Типова інструкція". Київ, ОЕП "ГРІФРЕ", 2004, 47с.

УДК 621.31.048.015

КОМБИНИРОВАННЫЙ ГЕНЕРАТОР МИКРОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ БОЛЬШОЙ ЭНЕРГИИ ПО МЭК 61000 – 4 -5

Доценко В.И., канд. техн. наук, **Князев В.В.,** канд. техн. наук, **Лесной И.П.,**
Недзельский О.С., Немченко Ю.С. (г. Харьков, Украина)

Combined generator of micro-second pulsed disturbances of high energy with the form of the impulse 1,2/50 Os has been elaborated and put into operation. The basic technical characteristics, principle of operation and peculiarities of the scheme and design solutions have been described.

В соответствии с требованиями стандарта МЭК 61000-4-5 [1] технические средства (ТС) подлежат испытаниям на устойчивость к воздействию микросекундных импульсных помех (МИП) большой энергии. Требования к амплитудно-временным параметрам (АВП) импульсов тока и напряжения, их полярность, количество испытательных импульсов также нормированы. Технические требования к генератору МИП, установленные указанным выше стандартом, представлены в табл. 1.

Разработанный и введенный в эксплуатацию в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» генератор МИП, являющийся частью комбинированной испытательной установки КУ-МИП-6, полностью соответствует характеристикам, приведенным в табл. 1.

Структурная схема генератора МИП представлена на рис.1.

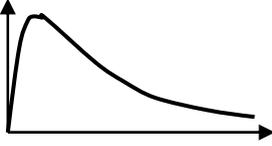
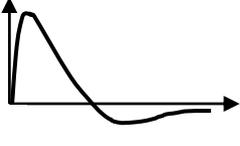
Основой генератора является разрядный контур, образованный высоковольтным конденсатором С1, искровым управляемым разрядником F1 и линейными формирующими элементами блока формирующего А4. Особенностью схемно-технического решения разрядного контура является наличие емкостно-омического делителя с переключаемыми уровнями выходного сигнала, что позволяет получить заданные амплитуды импульса напряжения от 6 кВ до 0,5 кВ при одном и том же зарядном напряжении конденсатора С1. Это позволяет, в свою очередь, использовать искровой разрядник F1 при одном и том же рабочем напряжении.

Еще одной особенностью схемы разрядного контура является использование в

не более 0,1с. Время цикла – 60с±0,1с.

Таблица 1

Основные технические характеристики генератора

Характеристика	Выходное напряжение в режиме х.х.	Выходной ток в режиме к.з.
1. Форма импульса		
2. Амплитуда импульса	0,5 кВ ± 10 %	≥ 0,25 кА
	1 кВ ± 10 %	≥ 0,5 кА
	2 кВ ± 10 %	≥ 1 кА
	4 кВ ± 10 %	≥ 2 кА
	6 кВ ± 10 %	≥ 3 кА
3. Длительность фронта по МЭК 61000-4-5 рис.2, рис.3	1,2 мкс ± 30 %	8,0 мкс ± 20 %
4. Длительность импульса на уровнях 0,5	50 мкс ± 20 %	20 мкс ± 20 %
5. Полярность	Положительная, отрицательная, чередующаяся	
6. Интервал между импульсами, сек.	60 ± 0,1	
7. Сдвиг по фазе импульсов по отношению к переменному напряжению в сети питания, град.	0 – 360 через 15° ± 5°	
8. Погрешности измерения амплитудно-временных параметров МИП	± 10 %	
9. Эффективное выходное сопротивление генератора	Не более 2 Ом	

Примечания: 1 – Амплитудно-временные параметры (АВП) импульсов выходного напряжения КИГ-МИП определяются в режиме х.х. (нагрузка не менее 10 кОм); 2 – АВП импульсов выходного тока КИГ-МИП определяется в режиме к.з. (нагрузка не более 0,1 Ом); 3 – Длительность фронта импульсов выходного напряжения и тока определяется как интервал T_1 по МЭК 61000-4-5 рис.2, рис.3.; 4 – Длительность импульсов выходного напряжения и токов определяется как интервал T_2 по МЭК 61000-4-5 рис.2, рис.3.

Расчет и оптимизация схемы разрядного контура генератора осуществлялось посредством компьютерного моделирования и анализа.

Литература: 1. IEC 61000-4-5: 1995. EMC – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 5: Surge immunity test.

УДК 621.7.044

**ИМПУЛЬСНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ В ТЕХНОЛОГИИ
МАШИНОСТРОЕНИЯ КАК ЭЛЕМЕНТЫ ГИБКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
СИСТЕМ**

Савченко Н.Ф., канд. техн. наук, **Кривошапка Ю.Н.**, канд. экон. наук
(г. Харьков, Украина)

Clause is devoted to development of methods of complex influence on a product from positions of increase of consumer properties.

Как сложные задачи, стоящие перед технологией машиностроения, можно отметить такие особенности многономенклатурного производства – с одной сто-

роны, необходимость снижения себестоимости изготовления деталей, а, с другой, усложнение и, в ряде случаев, исчерпание возможностей ресурсо- энергосбережения. Это обусловлено тем, что до 85 % изделий в мировом масштабе выпускают в условиях единичного и мелкосерийного производства (ЕМП), себестоимость которого в среднем пока в 5 раз выше массового, 70% деталей, обрабатываемых на станках, выпускают малыми партиями (от 2 до 200 штук) в широкой номенклатуре (до 4000 типов). Частая смена объектов производства требует сокращения сроков освоения новой продукции, что невозможно без решения сложных задач интенсификации производственных процессов при условии снижения энергозатрат на их проведение и повышения ресурса. При этом повышение конкурентоспособности изделий обуславливает и решение задач максимизации потребительских свойств: не только снижение цен, но и существенное (на 30 – 50 и более процентов) повышение ресурса изделий и их коррозионной стойкости.

С этой целью в промышленности широко используют комплексные подходы к разработке технологических процессов: формообразование (предварительное – окончательное) и специальные методы совершенствования потребительских свойств изделия (структуры, качества поверхностного слоя). Во многих случаях экономически оправданными будут методы с использованием импульсных энергоносителей, а также динамические (ударные) способы механической обработки поверхностного слоя изделия или их локальных зон, среди которых можно выделить струйную, гидроструйную обработку, обработку дробью, центробежную обработку, беспрессовые методы и т. п., оказывающие существенное влияние на состояние поверхностей деталей и изделий.

Представляется целесообразным введение комплексного показателя эффективности использования того или иного метода с позиций повышения конкурентоспособности изделий. В общем виде он может быть представлен как

$$K_{\dot{Y}O} = \Phi \left(\frac{A_{\dot{I}D2}}{A_{\dot{I}D1}}; \frac{\hat{E}_{D2}}{\hat{E}_{D1}}; \frac{T_{\delta}}{T_H}; \left(\frac{M_{\partial}}{M} \right)_{\delta}; \left(\frac{M}{M_{\partial}} \right)_H; \frac{\Pi_{\delta}}{\Pi_H}; k_P \right)^{\beta},$$

где показатели A , K , T , M , Π – характеризуют соответственно количество потребительских свойств, возможность изменения качества, длительность цикла изготовления товарной партии деталей, массовые характеристики изделия как товара, потребности в ресурсах; β – коэффициент, учитывающий эволюционное изменение параметров изделия.

Проведенный анализ существующих методов комплексного воздействия на заготовку – деталь показывает несомненные преимущества с позиций энергоресурсосбережения и качества изготовления изделий импульсных методов. Так, импульсные методы, как пример расширения потребительских свойств, позволяют в десятки раз увеличить при необходимости габариты изделий и повысить их герметичность, повысить в 1,5...3 раза прочность изделий и их ресурс. Однако их широкое применение ограничено также, как и большинства прогрессивных технологий, возрастающей стоимостью энергоносителей, и, в особенности, требованиями техники безопасности, так как их эффективность обусловлена осуществлением в технологических зонах взрывных или взрывоподобных воздействий.

Поэтому рациональным представляется использование высокоэнергетических веществ в качестве энергоносителей, среди которых особое место можно выделить

ацетилену и газам – его заменителям. По энергетической характеристике ацетилен находится между топливо-кислородными и топливо-воздушными газовыми смесями, при сгорании которых выделяется примерно 71—90 и 20—25 ккал/моль соответственно. Ацетилен более богат энергией, чем такая известная взрывчатая газовая смесь, как водород с кислородом ($Q = 45,5$ ккал/моль). Количество тепла, выделяемое при разложении 1 кг ацетилена, примерно в 2 раза больше, чем при взрыве такого же количества твердого ВВ тротила. Как импульсные энергоносители перспективны не только газообразный ацетилен и его смеси с инертными газами, но также и ацетилен в твердом, жидком состоянии и некоторые его соединения с металлами (ацетилениды).

Поэтому был проведен поиск альтернативных импульсных энергоносителей, включая регулирование в широких пределах таких свойств как энергия воспламенения, энергетические параметры смесей, возможность интенсификации параметров.

Примером эффективных и широко универсальных методов комплексного воздействия на заготовку – деталь могут считаться импульсные методы с использованием газовых энергоносителей, которые позволяют решать широкий круг задач, связанных с повышением качества изделий как при формообразовании, так и при изменении структуры и восстановлении деталей путем нанесения покрытий. Этим достигается повышение износостойкости и ресурса изделий, защита от коррозии и воздействия высоких температур деталей машин при эксплуатации, восстановлении изношенных деталей и др. Так, после импульсной газовой штамповки может быть осуществлено газодетонационное напыление покрытий, когда мелкие частицы расплавленного материала, перемещаясь со скоростью от 100 до 3000 м/с, достигают поверхности деталей в пластическом состоянии. При ударе о поверхность частицы деформируются и, внедряясь в ее неровности, образуют покрытие. Между металлическими частицами и поверхностью детали образуется бездиффузионное соединение, характеризуемое, как правило, механическими связями.

Основными достоинствами всех видов газодетонационного воздействия, как формообразования, так и завершающих стадий формирования потребительских свойств изделий – способов упрочнения и восстановления деталей, являются незначительный (120...200 °С) их нагрев, возможность нанесения покрытий практически с любыми наперед заданными свойствами, толщиной от 0,1 до 2..3 мм и более из любых металлов и неметаллов, а также в ряде случаев относительная простота технологического процесса и применяемого оборудования.

Детонационное воздействие является процессом формирования поверхности, их очистки и нанесения покрытий на поверхности восстанавливаемого или упрочняемого изделия путем направленного детонационного взрыва газовой смеси. Благодаря высоким скоростям (в 4...7 раз больше, чем при других видах ГТН), частицы легирующего или напыляемого материала полностью деформируются и, смачивая поверхность подложки, тесно соприкасаются со всеми ее неровностями, обеспечивая высокие плотность (до 1 %) детонационных покрытий и прочность сцепления их (до 240 МПа) с основным металлом. Структура покрытия формируется в результате серии взрывов. При ударе о поверхность кинетическая энергия полностью переходит в тепловую, что является дополнительным преимуществом этого способа. В зависимости от конструкции газового температурного тракта различают детонационное напыление с предварительным форкамерным зажиганием взрывчатой смеси и с зажиганием ее непосредственно в стволе установки. Применение многоствольных

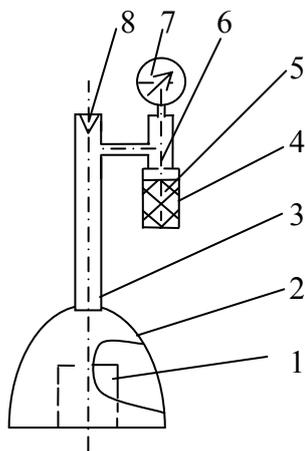


Рис. Импульсное устройство модульного типа: 1 – объект воздействия (заготовка); 2 – энергоблок; 3, 8 – элементы модуля инициирования импульсного воздействия (детонационная трубка и блок поджига смеси); 4, 5, 6 – модуль энергоносителей (корпус газогенератора, реагенты, активатор); 7 – модуль контроля и управления.

(в самом простом варианте – ацетиленовый).

Примером расширения области применения подобного типа импульсных устройств могут быть и процессы в зоне высокотемпературного контакта метаемых частиц и материала основы, где в процессе непосредственного газо или иного воздействия возникают химически чрезвычайно стойкие интерметаллидные соединения, прочно сцепляемые с основным сплавом (сравнимы и могут превышать предел текучести материала основы). При этом высокоскоростные потоки позволяют повысить и эффективность предварительной очистки поверхности, прежде всего, в труднодоступных зонах типа полостей и каналов.

Основные характеристики импульсной установки

Энергоемкость:

максимальная / при одноимпульсной воздействию

на обрабатываемый объект / 1,4 Мдж;

минимальная / количество воздействий - 20 и более/ 24 Кдж.

Начальное давление газовой смеси в полости камеры 0,3...3 МПа.

Рабочие давления:

минимальные 45...55 МПа;

максимальные 120...300 МПа.

Масса устройства без реагентов не более 25 кг.

Размеры устройства:

диаметр 40 + 2 мм;

высота 2-3 м.

Состав горючих газов: природные газы, ацетилен

Проведенные экспериментальные исследования с помощью опытно-промышленной установки подтвердили возможность создания высокоскоростных термоимпульсных потоков – температура до 500⁰С и скорость интерметаллидных

установок позволяет существенно повысить производительность процессов.

Для расширения технологических возможностей импульсных методов с целью изготовления деталей в многономенклатурном производстве, а также обработки сложных сварных конструкций методами комплексного воздействия и формирования потребительских свойств разработано импульсное газодетонационное устройства (рис.) [патент Украины № 72357].

Его особенностью является использование в конструкции модульного принципа, обеспечивающего возможность дополнения различными конструктивными элементами в зависимости от типа технологического процесса. С целью уменьшения безопасности работ в конструкции импульсного устройства используется специальный газогенератор

включений для микролегирования поверхности достигали более 250 м/с.

Использование предлагаемой поэлементной очистки поверхностей от масляных, глубинных загрязнений позволит существенно (в 10 и более раз) снизить сроки и стоимость подготовки поверхности к последующим методам защиты против коррозии, например изделий типа резервуаров. При этом срок службы изделий из конструкционных материалов в агрессивных средах типа щелочных и слабо кислотных увеличивается в 3-5 раз.

Таким образом, разработка мобильного типа импульсных устройств с изготовлением непосредственно в технологической зоне энергоносителей, позволяет считать перспективным продолжение исследований в области разработки и внедрения в производство высокоэнергетических устройств.

УДК338.322

ФАКТОРЫ ВОЗРОЖДЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СФЕРЫ В УКРАИНЕ

Тимофеев В.Н., докт. экон. наук (г. Харьков, Украина)

In work actions on overcoming crisis of industrial sphere in Ukraine are considered.

Развитие рыночных отношений в Украине проявляется в форме комплекса сложных трансформационных явлений и процессов социально-экономического характера как позитивного, так и негативного направлений. Заметно оживление и подъем экономики за последние 3-4 года. Однако форсированная либерализация экономической деятельности в начале 90-х годов прошлого столетия в условиях пока еще не сформировавшейся нормативно-законодательной базы рыночных отношений закономерно вызвала в значительной степени хаотическую трансформацию экономической системы страны. Организация любой экономической системы является, как известно, суперсложной, и, следовательно, инертной. Последнее ее свойство подтверждает тезис о постепенности и планомерности ее трансформации во избежание экономических кризисов. Однако недостаточное развитие теории организации экономических систем стало причиной весьма поспешных преобразований в экономике, что не замедлило проявиться затяжным и достаточно тяжелым социально-экономическим кризисом. Так, фактический объем валового внутреннего продукта (ВВП) снизился более чем в 2 раза и составил к 1995 г. по сравнению с 1990 г. 41,5 %, в 1997г. – 42 %, в 1999 г. – 41,7 % [1]. Объем производства продукции промышленности уменьшился за этот период несколько в меньшей степени, но также это можно отнести к категории катастрофического спада. По отношению с 1990 г. объем производства в промышленности составил в 1995 г. – 52 %, а в 2000 г. – 58 %. Особенно высокий спад обозначился в такой сложной и наукоемкой области промышленности как машиностроение. К 2000 г. объем производства по сравнению с 1990 г. снизился по металлорежущим станкам в 28,5 раз, по тракторам – в 26,6 раз, по электродвигателям переменного тока – в 10,3 раза, по грузовым и легковым автомобилям соответственно – в 2,5 раза и 8,8 раза, по большим электрическим машинам – в 3 раза, по персональным компьютерам – в 2,4 раза [1].

В сельском хозяйстве картина примерно такая же. Объем производства сельскохозяйственной продукции составил по сравнению с тем же периодом в 1995 г. – 64,9 %, а в 2000 г. – 53,3 %. В животноводстве эти величины соответственно 56,4 % и 42,4 % [1].

Следует признать кризис в Украине также весьма затяжным. Так, всемирно из-

вестный кризис в 30-х годах прошлого века в США под названием "Великая депрессия" считался одним из наиболее протяженных, и длился около 5 лет, в период 1929-1933 гг. Спад промышленного производства составил при этом 46 %. Ликвидация кризиса, как известно, потребовала кардинальных мер в направлении повышения уровня централизации управления экономикой и, в частности, банковской сферой.

Следует отметить, что начиная с 2000 г. в стране стал заметен подъем экономических показателей. Индекс ВВП к 1990 г. составил в 2000 г. – 44 %, а в 2003 г. достиг 55 %. Индекс промышленной продукции повысился к 2003 г. до 82 % [1]. Однако кризисные явления в стране остаются. Доля убыточных предприятий в промышленности составила в 2000 г. – 42 %, что больше, чем в 1990 г. более чем в 20 раз [2]. В 2003 г. этот показатель также составлял достаточно значительную величину – 40 %.

Весьма опасной тенденцией является уменьшение численности работников, занятых в промышленности, которая составила в 2000 г. к уровню 1990 г. – 59 %, а в 2003 г. – 48,2 %, т.е. уменьшилась более чем в 2 раза [1]. Это служит подтверждением снижения производственного потенциала экономики страны. Уход работников из своей профессиональной сферы, как показывает практика, весьма быстро снижает их квалификацию, изменяет их жизненную ориентацию и возвращение их на прежние предприятия становится проблематичным. Это подтверждает действительность работы харьковских заводов. Так, при получении новых заказов или определенном возрождении производства и соответственно увеличении потребности в рабочих кадрах, вернуть их на предприятие становится все труднее. Кроме того следует учитывать, что подготовка новых работников для производственной сферы весьма длительный и дорогостоящий процесс.

Снижается также инновационный потенциал страны. Подтверждением этого является существенное уменьшение численности работников, занятых научно-технической деятельностью. Так, в Харьковской области – одном из ведущих регионов Украины в сфере научных разработок, численность работников научных организаций уменьшилась в 2000 г. по сравнению с 1991 г. более чем на 60 %, а в 2003 г. составила к 1991 г. – 36,9 % [2]. Кроме того, направленность научных работ значительно в меньшей степени связана с производственной сферой. К примеру, объем работ научных организаций в Харьковской области составил в 2003 г. около 510 млн. грн. Причем доминирующая часть этих работ, составившая 92,7 %, была посвящена проблемам операций с недвижимостью, сдачи внаем и услугам юридических лиц. Научные разработки в обрабатывающей промышленности составили лишь 2,6 % [2]. Аналогичные процессы проходят в целом по стране. По отношению к 1990 г. численность исполнителей научных и научно-технических работ составила в 2000 г. – 38,7 %, в 2003 г. – 33,5 %, т.е. уменьшилась в 3 раза [1].

В определенной степени состояние экономики в стране может характеризовать показатель срока отставания по отношению к прежним темпам развития экономики (до 90-х годов прошлого века). Учитывая, что ежегодные темпы роста ВВП составляли около 2,5 % (т.е. годовой индекс $I = 1,025$), то этот показатель за 12 лет (с 1991 по 2003 г.) должен был вырасти на 34,5 % (т.е. общий индекс роста $I_o = I^{12} = 1,345$). При фактическом индексе ВВП в 2003 г. к 1990 г., равном $I_\phi = 0,55$, срок отставания в 2003 г. составил

$$\dot{O}_{i\phi} = \frac{I_o - I_\phi}{I - 1} = \frac{1,345 - 0,55}{1,025 - 1} = 31,8 \text{ л.}$$

Для промышленности, где среднегодовые темпы развития были несколько выше и составляли около 3,5 % (т.е. $I = 1,035$), общий индекс роста за тот же период должен был составить $I_o = 1,51$. При фактическом индексе в 2003 г., равном $I_\phi = 0,82$, срок отставания в 2003 г. составил: $\dot{O}_i \delta = \frac{1,51 - 0,82}{1,035 - 1} = 19,7$ лет.

В целом следует отметить, что масштабы и глубина кризиса достигли такого уровня, который характеризует ситуацию в обществе как экстремальную. Это служит объективной предпосылкой необходимости повышения уровня централизации управления социально-экономической системой. Как подтверждает общественный опыт, прямая зависимость уровня централизации управления социальной организацией от степени экстремальности условий, в которых она функционирует, проявляется как объективная закономерность (так, система управления в армии или пожарной части является жестко централизованной в отличие, например, от системы управления отдыхом людей, находящихся в отпуске).

Основные причины кризиса производства довольно тесно взаимосвязаны и представляют сложный комплекс причинно-следственных связей. Решение этого комплекса проблем с целью развития производства предусматривает реализацию мероприятий двух направлений: стратегического и тактического. Стратегическое включает мероприятия более продолжительного характера касающиеся совершенствования организации экономической системы государства на основе решения теоретических и практических вопросов этой сложной проблемы. Главной задачей при этом является определение оптимального для развития страны соотношения внешнего регулирования и саморегулирования экономических процессов в разной рыночной среде с учетом отраслевой и региональной специфики. Это отвечает, с одной стороны, объективной тенденции дальнейшего и непрерывного разделения труда и, как следствие, повышению взаимозависимости субъектов экономической деятельности, которая обуславливает необходимость совершенствования ее внешнего регулирования. С другой стороны, должны быть задействованы резервы эффективности самоорганизации и инициативы субъектов их деятельности в рыночной среде.

Тактическое направление мероприятий должно иметь характер форсированных, но таких четко управляемых, действий относительно преодоления затяжного кризиса производственной сферы. Это обусловлено тем, что ситуация в экономике приобрела признаки экстремальности с возросшей вероятностью потери значительной части совокупного потенциала страны (производственного, научного, социального, интеллектуального, демографического и др.) и реальной угрозой национальной безопасности. Это, во-первых, объективно обуславливает необходимость повышения уровня управляемости экономикой со стороны государства. Кроме того среди основных путей преодоления кризиса производства этого направления следует также назвать такие тесно между собой взаимосвязанные, как создание в экономике мотивационного механизма подъема производства и существенное поднятие совокупного спроса на продукцию отечественного производства.

Повышение уровня государственного управления экономикой целесообразно реализовать в следующих взаимосвязанных направлениях:

– активизация управления развитием конкуренции, государство должно не только пассивно за счет антимонопольного законодательства оказывать содействие развитию конкуренции, но также стать ее активным участником в основных сферах

- экономической и инвестиционной деятельности, используя государственный сектор народного хозяйства и гибкую систему госзаказов;
- повышение уровня централизации управления с целью более эффективного преодоления кризиса в отдельных отраслях и направлениях развития с учетом определенных приоритетов. Это предусматривает прежде всего концентрацию в руках государства существенной доли основных ресурсов (финансовых, материальных, энергетических, орудий труда и др.) с возможностью их прямой льготной поставки непосредственным потребителям с дальнейшим контролем и строгой ответственностью последних за их целевым использованием. Имеет смысл также использование опыта Японии по восстановлению производства в послевоенные годы и с этой точки зрения пересмотр и ужесточение на период выхода из кризиса ценовой политики относительно товаров "стабилизационной номенклатуры" (энергоресурсов, важнейшего сырья, материалов, т.е. основных товаров низкой ценовой эластичности спроса);
 - развитие системы управления государственным сектором экономики, повышение уровня эффективности его функционирования на основе совершенствования процедуры принятия решений, системы оценки, контроля и ответственности деятельности его руководства;
 - разработка и постепенное внедрение системы сертификации качества деятельности предприятий определенных сфер с соответствующим стимулированием независимо от форм собственности по критериям: 1) выполнение условий лицензирования (для тех, где последнее имело место); 2) эффективность деятельности; 3) динамика развития;
 - совершенствование государственной системы протекционистских мероприятий по защите отечественного производства, исходя из ситуации в стране, как таковой, что содержит угрозу национальной безопасности в экономической и, как следствие, в политической сферах.

Вторым важным комплексом мероприятий этого направления есть создания в экономике мотивационного механизма подъема производства. Его главной целью есть, во-первых, создание условий равновыгодности разных сфер экономической деятельности при определенном приоритете производственной деятельности на период выхода из кризиса и восстановление этого сектора до уровня адекватного его потенциалу.

Во-вторых, указанный мотивационный механизм должен создавать условия для обеспечения выгоды роста массы прибыли (дохода) главным образом не за счет повышения ее нормы, а за счет расширения объема производства и реализации продукции и услуг. То есть надо создать систему мотиваций снижения цен (а в худшем варианте сдерживания их роста) для соответствующего роста объема продажи согласно закону спроса. В-третьих, сюда следует отнести создание приоритетного льготного режима для прямых отечественных и зарубежных инвестиций непосредственно в производственную сферу с объединением финансово-кредитной политики и производственной деятельности по критерию – минимум периода преодоления кризиса производства.

Главным фактором указанного мотивационного механизма должен быть отлаженная система налогообложения с активной стимулирующей и регулирующей функциями. По сравнению с существующей она должна быть упрощенной и включать меньшее количество налогов, особенно косвенных. Учитывая желательную

нацеленность ее на снижение цен и нормы прибыли, объектом прямого налогообложения целесообразно сделать ту долю цены, которая формируется продавцом. Это может быть добавленная стоимость, но без амортизационных отчислений (как фактора восстановления основного капитала), т.е. доход.

Для усиления регулирующей функции налога на доход в направлении обеспечения указанной равновыгодности разных форм деятельности и повышения привлекательности вкладывания капитала в производственную сферу на период преодоления кризиса ставку этого налога целесообразно поставить в прямую зависимость от основного критерия эффективности вложения капитала – нормы дохода. Таким образом предлагается использовать гибкую дифференцированную ставку налога для обеспечения действия этой зависимости в направлении снижения цен и соответствующего роста объемов продажи (товаров, услуг, кредитов и др.).

Для стимулирования роста производственной базы предприятия и развития собственного капитала норму дохода предлагается брать не к себестоимости товара (чтобы предотвратить искусственное ее завышение), а к собственному капиталу без учета оборотных средств (последние, как известно, в положительной тенденции должны относительно уменьшаться). Это будет стимулировать рост собственного капитала и инвестирование в него. Повышение совокупного спроса на отечественную продукцию (третий из названных комплекс мероприятий) имеет доминирующее значение. Его снижение является основной и непосредственной причиной спада производства. В этот комплекс включается широкий спектр мероприятий, где среди основных можно назвать следующие.

Во-первых, следует более основательно определять приоритеты и направления решения проблемы повышения совокупного спроса. Имеется в виду прежде всего пересмотр подходов к его регулированию с монетаристских позиций, которые сейчас превалируют. Известная направленность этих подходов на сдерживание роста совокупного спроса должна быть значительно ослаблена во время восстановления производства. Это касается и жесткой направленности монетаристской концепции на сдерживание роста денежной массы, особенно в условиях весьма низкой монетизации ВВП, которая существует в Украине.

Во-вторых, это повышение покупательной способности потребителей конечной продукции (т.е. населения), которое при низком уровне использования производственных мощностей приобретает важнейшее значение. В нынешних условиях это мероприятие следует рассматривать как постепенное инвестирование народного хозяйства, начиная с областей производства предметов потребления. Это реализуется повышением заработной платы работающих, уменьшением и постепенной ликвидацией задолженности по заработной плате и пенсиям (частично также за счет контролируемой эмиссии).

В-третьих, это снижение опасности активизации инфляции затрат и инфляции спроса. Для снижения вероятности первой из них повышение заработной платы может осуществляться преимущественно неинфляционными методами, которые обеспечивают неизменность себестоимости продукции. Это может быть реализованным, например, за счет соответствующего снижения доли отчислений на социальное страхование и других платежей от заработной платы по следующей их компенсации на основе перераспределения доходной части госбюджета. С восстановлением производства необходимость в последнем отпадает. Предотвращение активизации инфляции спроса при росте денежных доходов потребительского сектора будет

определяться прежде всего эффективностью государственной политики сдерживания роста цен экономическими методами.

В этот комплекс входят также экстраординарные мероприятия антикризисного характера по формированию спроса и стимулированию сбыта отечественной продукции и создание целостной системы по решению задач форсированного подъема и расширения экспортной деятельности. Учитывая сложный и долгосрочный процесс проникновения на рынки западных государств и откровенную угрозу национальной безопасности от продолжения кризиса, основным направлением деятельности этой системы должно безусловно быть возвращение на рынки государств бывшего социалистического лагеря и тем более стран СНГ. Это предусматривает максимальное использование существующего и распространение «правового пространства» этой деятельности для взаимовыгодного сотрудничества в области производственной кооперации, научной и информационной деятельности, пограничных взаимоотношений, движения капиталов и рабочей силы и пр. Это, естественно, не исключает также реализацию обоснованной стратегии расширения экспорта в другие страны мира по критерию – минимум срока и упрощенность условий для его организации и повышения объема.

В целом следует отметить, что перечисленные мероприятия по преодолению кризиса производственной сферы безусловно не охватывают весь спектр антикризисных факторов, так как накопленный комплекс проблем представляет собой весьма сложную систему. Но не подлежит сомнению, что восстановление производства требует максимального использования научного подхода, а также энергичных и ускоренных действий.

Литература: 1. Статистичний щорічник України за 2003 рік. К.: Держкомстат України, 2004.-621 с. 2. Інноваційна діяльність в Харківській області Стат. зб. / ГУС у Харківській обл.-Х. 2004, 61 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Поздравление	3
1. Научные концепции развития технологии машиностроения, механической и физико-технической обработки	4
Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якимов А.А. Энергетический баланс работ при прерывистом шлифовании.	4
Новиков Ф.В., Дитиненко С.А., Ковальчук А.Н. Финишная обработка твердосплавных изделий алмазными кругами на металлических связках.	8
Якимов А.В., Ларшин В.П., Лищенко Н.В. Расчет температуры и глубины дефектного слоя при резьбошлифовании.	10
Ларшин В.П., Лищенко Н.В., Рагнев И.П. Компьютерное моделирование технологической системы резьбошлифования.	17
Ларшин В.П., Лищенко Н.В. Компьютерная диагностика многониточного резьбошлифования ходовых винтов.	20
Лавриненко В.И., Лещук І.В. До питання розробки спеціальних конструкцій шліфувального інструменту з НТМ.	25
Шепелев А.А., Поладко Е.П., Рябченко С.В., Гржибовский Б.Б., Шепелев А.А. (мл.), Дуброва А.Е. Эффективные шлифовальные инструменты на основе новых инструментальных композитов из СТМ.	28
Усов А.В., Якимова О.А. Исследование температурного поля при заточке режущего инструмента.	34
Линчевский П.А., Буюкли И.М., Иоргачев В.Д. Компенсация размерного износа резцов при растачивании отверстий цилиндров термопластавтоматов.	40
Линчевский П.А., Новак Г.П. Технология нанесения масляных карманов на поверхности трения.	45
Линчевский П.А., Оргиян А.А., Онищенко С.М. Тонкое растачивание отверстий с прерывистой поверхностью.	48
Лебедев В. Г., Чумаченко Т. В. Состав напыленных керамических слоев и его влияние на трещиностойкость при шлифовании.	53
Клименко Н.Н., Лебедев В.Г. Вопросы улучшения качества поверхности при шлифовании напыленного слоя армированного карбидами.	54
Умінський С.М. Вплив параметрів верстатного зачеплення на показники якості при обробці методами вільного обкату.	56
Умінський С.М., Якімов О.О. Дослідження впливу зміни кута схрещування осей спряжених поверхонь заготівлі та інструменту на якість відробки.	59
Умінський С.М. Вплив зміни кута схрещування осей спряжених поверхонь на показники якості при шевінгуванні методом «короткого ходу».	62
Гусарев В.С. Структурная оптимизация технологического процесса и технологической системы.	65
Марчук В.І., Заблоцький В.Ю. Технологічне керування параметрами мікрогеометрії робочих поверхонь кілець роликотідшипників на токарно-автоматних операціях.	69
Марчук В.І., Денисюк В.Ю., Лапченко Ю.С. Технологічне керування віб-	

роакустичними характеристиками доріжок кочення кілець роликотідишипників на операціях безцентрового шліфування.	72
Крюк А.Г., Браташевский А.Ю., Дудко П.Д. Лазерные технологии – составляющая инновационных процессов.	75
Клещёв Г. М. Математическая модель создания адаптивных интегрированных систем механопроизводства.	77
Клещёв Г. М., Балтовский А. А., Кухаренко С.В. Разработка и исследование модели преобразователя ток-частота и цифровых блоков.	81
Тихенко В.Н., Волков А.А. Исследование зависимости давления в гидроприводе стола плоскошлифовальных станков от скорости движения.	84
Рябчук В.Э., Тихенко В.Н. О виртуальном проектировании нового оборудования.	86
Серховец О.И. Исходные данные для динамических расчётов круглошлифовальных станков.	89
Хавін Г.Л. Точіння склопластиків алмазним інструментом.	93
Анельчик Д. Е. Высокопроизводительная технология абразивного шлифования деталей с износостойкими покрытиями.	96
Ларшин В.П., Челиканов Г.М. Интегрирование конструкторской и технологической подготовки производства на основе унифицированных технологий.	101
Иванов И.Е., Новиков Ф.В. Влияние методов формообразования на точность механообработки.	108
Дашенко А.Ф., Бажанов А.И., Панкратов Н.М., Котов О.В. Полигон для тензометрических исследований нагруженности прицепов.	113
Макурин Н.С., Королева Я.Ю. Критерии эффективности производственных технологических систем.	115
Новиков Ф.В., Шкурупий В.Г. Обоснование связи геометрических характеристик светоотражающих поверхностей штанг с отверстиями с их эксплуатационными свойствами.	119
Гуцаленко Ю.Г., Новиков Ф.В. Математическое моделирование и анализ технологических возможностей операций высокопроизводительного алмазного шлифования изделий из высокопрочных пластичных материалов.	126
Проволоцкий А.Е., Негруб С.Л. Определение площади пятна контакта полимер-абразивного эластичного инструмента с обрабатываемой поверхностью.	135
Новиков Ф.В., Яценко С.М. Новый упрощенный подход к расчету температуры поверхностного слоя детали при ее механической обработке.	137
Дудин А.Т. Теоретическое обоснование условий повышения эффективности абразивно-шлифовальной обработки.	147
Прево И.Д., Хавин В.Л. Расчет вибраций в процессе точения с использованием средств псевдоаналогового моделирования.	154
Мацевитый В.М., Казак И.Б., Вакуленко К.В. Критерий высокотемпературной адгезионной активности тугоплавких соединений, составляющих основу инструментальных материалов и покрытий для режущих инструментов.	157
Карпусь В.Е., Граница В.А. Анализ конструктивно-технологических параметров комбинированного инструмента.	159
Буденный М. М., Мовшович А. Я. Технологическая оснастка для гибких производственных систем.	162

Буденный М.М. Расширение технологических возможностей универсально-сборных приспособлений.	166
Худобин Л.В., Веткасов Н.И. Методика определения расхода смазочного материала при шлифовании композиционными кругами.	169
Михайлин С.М., Худобин Л.В., Веткасов Н.И. Композиционные круги для торцового шлифования.	171
2. Прогрессивные технологии, оборудование, инструменты и технологические системы	174
Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Поздняков Н.Г. Влияние исходной структуры на качество закаленного слоя гильзы цилиндра из низколегированного чугуна двигателя типа СМД.	174
Скобло Т.С., Власовец В.М., Ридный Р.В. Упрочнение восстановительных покрытий деталей микролегированием с использованием отходов ТЭС.	176
Скобло Т.С., Власовец В.М., Марченко М.В. Влияние модификатора и легирующих элементов на качество и свойства втулки цилиндра малых судов и оценка их по коэрцитивной силе.	180
Евстратов В.А., Кротенко Г.А., Левченко В.Н. Математическое моделирование формоизменения и силового режима выдавливания в условиях радиального и вихревого течения.	184
Плеснецов Ю.А., Крюк А.Г. Экспериментальные исследования энергосиловых параметров формообразования деформационно упрочненного корытного профиля 80x60x32x2,5 мм.	192
Браташевський О.Ю., Полякова А.Г., Горбачова Л.В., Польотов В.А., Каплуновський В.О. Дослідження зносостійкості термооброблених легованих латуней та бронз.	194
Браташевський О.Ю., Полякова А.Г., Горбачова Л.В., Польотов В.А., Каплуновський В.О. Прогресивна технологія термообробки ножів бульдозерів.	198
Ткаченко В.П., Новиков Ф.В., Ткаченко С.В. Исследование возможности применения менее дефицитных сталей для изготовления релитовых торцовых уплотнений.	200
Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Науменко А.А., Бузько С.В., Золотарев В.В. Критерии применения устройств поточного электрического контроля изоляционных элементов кабельных изделий на современных автоматизированных экструзионных линиях.	203
Чуйкова Е.В. Микроструктура и характер разрушения образцов, полученных штамповкой из жидкого состояния с последующим газостатическим объемным уплотнением.	205
Цюрюпа В.Н., Любченко А.П., Сатановский Е.А. Поликомпонентные электролитические покрытия – эффективный способ повышения работоспособности тяжело нагруженных деталей.	208
Пашкова Г. И. Исследование остаточных напряжений в коленчатых валах транспортных дизелей.	209
Пашкова Г. И., Степанюк А. И. Об усталости сварных соединений блоков транспортных дизелей.	212

Орехов С.Л., Каракуркчи Д.А., Гайнутдинов А.В. Молчанова Л.В. Некоторые особенности конструкции пьезосорбционных датчиков.	215
Воїнова С. О., Воїнов О. П. Ілатометричний малоінерційний датчик температури теплоносія в трубопроводі великого діаметра.	220
Воїнова С. О. Можливості управління екологічною характеристикою технічних об'єктів.	221
Исаков С.Н. Ультразвуковая сварка пластмасс с элементами самоконтроля и управления.	224
Бондарь С.В., Автономова Л.В. Прочностной анализ крышки корпуса датчика газа.	226
Невлюдов І.Ш., Яшков І.О., Яшков О.В., Коротецький В.І. Створення нових матеріалів – перспектива технологічного оновлення виробництва електронних апаратів.	229
3. Экономика и организация производства	231
Гринева В.Н., Гринева А.В. Стратегическое управление инновационным развитием предприятия.	231
Таньков К.М., Тридід О.М. Логістичний аудит в системі управління промисловим підприємством.	235
Орлов П.А. Теоретические аспекты определения сравнительной эффективности реальных инвестиций.	237
Мартиненко В. Я., Федишин Б. П. Інноваційна модель розвитку держави.	241
Колодізева Т.О., Руденко Г.Р. Моделювання логістичних витрат промислового підприємства.	244
Лукашев С.В., Мельникова К.В. Сучасні проблеми освоєння технологічних інновацій.	246
Ларшин В.П., Бажанов А.І., Міщенко О.М., Ларшина А.В. Наукова школа – ланка для активізації інноваційної діяльності в Україні.	249
4. Динамика и прочность машин, проблемы математики, механики и управления	252
Андреев Ю.М., Морачковский О.К. Разработка САПР динамики машин на основе специальной системы компьютерной алгебры.	252
Чернобрыво М.В. О применимости упрощенных математических моделей для расчетов конструкций при импульсном деформировании.	264
Милешкин М.Б., Библик И.В., Алексеева А.М. Особенности акустико-эмиссионной диагностики прочности комбинированных баллонов.	266
Милешкин М.Б., Библик И.В., Мамин Г.И. Анализ возможности контроля и диагностики прочности ремонтных муфт из полимерных композиционных материалов методом акустической эмиссии.	269
Онгирский Г.Г., Шупиков А.Н., Угримов С.В., Сметанкина Н.В., Ярещенко В.Г. Импульс давления, возникающий при столкновении самолета с птицей.	271
Полищук О.Ф. Исследование характеристик преобразователей вихретоковых дефектоскопов.	274

Божко А.Е., Белых В.И., Мягкохлеб К.Б. Функциональная зависимость площади магнитопровода на полюсах в электромагнитном вибровозбудителе.	277
Тарсис Ю.Л., Тарсис Е.Ю. Идентификация параметров дискретной модели коленчатого вала при динамических расчетах.	279
Морачковский О.К., Дружинин Е.И., Ромашов Ю.В. Метод бубнова-галеркина для анализа физико-механических процессов в конструкциях.	284
Андриевская Л.С., Морачковская И.О. Компьютерное моделирование упруго-пластического деформирования тонких поверхностей на основе теории R-функций.	289
Сало В.А. Расчет элементов конструкций с неоднородной по толщине структурой.	293
Батыгин Ю.В., Бондарь С.В. Физические основы магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов.	297
Лавинский Д.В., Егурнов О.Р. Особенности моделирования термоупругого состояния осесимметричных составных матриц.	300
Лавинский В.И., Лукьянов И.М. Особенности прочностного расчета матрицы импульсного прессы для уплотнения пористых материалов.	303
Дудин А.Т. Разработка клапанной системы для двигателя внутреннего сгорания.	306
Гайдамака А.В., Гапонов В.С., Музыкин Ю.Д., Тернюк Н.Э. О новой концепции создания поверхностных слоев антифрикционных трибоспряжений.	313
Шатохин В.М., Зайцев А.И., Кутовая О.В. Выбор параметров привода турбонаддува дизелей типа БТД по динамическим нагрузкам.	314
Гапонов В.С., Столбовой А.С., Музыкин Ю.Д. Оптимизация геометрических параметров многоклиновых подшипников скольжения с самоустанавливающимися вкладышами.	320
Музыкин Ю.Д., Гайдамака А.В., Столбовой А.С. Влияние температурного воздействия на работу торцовых уплотнений колесных редукторов мобильных машин.	322
Андрienko А.О. Система мониторинга реестра парка порталных кранов морской отрасли.	325
Нестеров Е. А. Моделирование эксплуатационных напряжений и перемещений в металлоконструкциях портовых кранов на примере козлового перегружателя «ЭДЕРЕР».	327
Семенов П.А. Анализ и синтез методов диагностирования расчетных металлоконструкций портовых кранов.	330
Свиргун О.А. Исследование влияния количества водоподводящих каналов и коэффициента заполнения на эксплуатационные характеристики резинометаллических подшипников.	332
Назаренко С.А. Многодисциплинарный анализ чувствительности для исследования жизненного цикла изделия.	334
Воробьев Ю.С., Гошкодеря В.П., Цыба А.Н. Влияния конструктивных факторов на спектр частот собственных колебаний системы диск-лопатки-связи.	336
Тернюк М.Е., Копійченко Ю.В., Дмитрук І.А., Бахнова Е.Л. Оцінка	

інноваційного рівня продукції.	340
5. Электрофизика и электроэнергетика	344
Колиушко Д.Г., Обруч И.В., Петков А.А. Программный комплекс для расчетов молниезащиты зданий и сооружений.	344
Савченко Н.Н. Кадровый потенциал и основные особенности его формирования.	347
Куприенко В.М. К вопросу о выборе формы импульса для исследования защитного действия молниеотводов.	348
Юферов В.Б., Ткачев В.И., Буравилов И.В., Пономарев А.Н., Ковтун Ю.В., Винников Д.В., Друй О.С., Скибенко Е.И. Многоканальная система питания плазменного катода.	352
Курашко Ю.И., Хвощан О.В. Анализ процессов, определяющих электромагнитную совместимость оборудования гит погружных установок для обработки призабойных зон нефтяных скважин.	354
Коробко А.И., Коробко З.И. Математическая модель поведения диэлектрической частицы в коаксиальном электрофилт্রে.	357
Коробко А.И., Коробко З.И. Математическая модель поведения проводящей частицы в коаксиальном электрофилт্রে.	359
Коробко А.И. Эффективная электрофилтровая система очистки трансформаторного масла.	362
Резинкина М.М., Князев В.В., Кравченко В.И. Моделирование процесса продвижения лидера молнии.	364
Доценко В.И., Колиушко Д.Г., Линк И.Ю. Выбор частоты измерительного тока для определения характеристик заземляющих устройств.	367
Доценко В.И., Князев В.В., Лесной И.П., Недзельский О.С., Немченко Ю.С. Комбинированный генератор микросекундных импульсных помех большой энергии по МЭК 61000 – 4 –5.	369
Савченко Н.Ф., Кривошапка Ю.Н. Импульсные методы обработки в технологии машиностроения как элементы гибких технологических систем.	371
Тимофеев В.Н. Факторы возрождения производственной сферы в Украине.	375

© Харьковская научно-производственная
корпорация «ФЭД», 2005

Научное издание

Труды 11-й Международной научно-технической конференции

Физические и компьютерные технологии

2-3 июня 2005 года, г. Харьков

Составили: Новиков Федор Васильевич
Якимов Александр Васильевич

Ответственный за выпуск
Кривошапка Ю.Н.

Оформление оригинал-макета
Бондарь Н.Б., Новиков Д.Ф.

Подписано к печати 30.05.2005 г. Формат 60x88/8.
Бумага офсетная. Усл.-печ. л. 24,1. Уч.-изл. л. 19,9
Тираж 300. Заказ № 991

Отпечатано в типографии завода «ФЭД». 61023, г. Харьков, ул. Сумская, 132