МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Ministry of Education & Science of Ukraine
National Technical University
«Kharkiv Polytechnic Institute»

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ

MODERN TECHNOLOGIES OF ENGINEERING

Збірник наукових праць

Printed scientific works

Видається з 2008 року

Випуск 11

ХАРКІВ НТУ «ХПІ» – 2016 – KHARKIV NTU «KhPI»

ББК 34.63 С 56
УДК 621.91

Державне видання
Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 13438-2322Р від 03.08.2007 р.
Друкується за рішенням Вченої Ради НТУ "ХПІ"

Редакційна колегія:

В. О. Федорович (відповідальний редактор),
В. Л. Доброскок (зам. відповідального редактора),
Н.В. Крюкова (відповідальний секретар),
І. М. Пижов, Ю. М. Внуков, А. І. Грабченко,
Б. Карпушевський, Я. Кундрак, П. П. Мельничук,
О. Я. Мовшович, М. В. Новіков, Ю. А. Сізий,
Ю. В. Тимофієв, Р. С. Турманідзе, В. А. Фадєєв,
М. Д. Узунян

Адреса редакційної колегії:

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
кафедра «Інтегровані технології машинобудування»
ім. М. Ф. Семка,
тел.: +38 (057) 706-41-43.

С56 **Сучасні** технології в машинобудуванні [Текст]: зб. наук. праць. – Вип. 11 / редкол.: В. О. Федорович (голова) [та ін.]. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – 324 с. – Укр., рос., англ. мовами.

Збірник містить наукові статті відомих вчених України і закордонних країн з актуальних проблем інтегрованих технологій, процесів різання і технологічного забезпечення якості, підвищення рівня освітньої підготовки з технології машинобудування. Викладено сучасні аспекти і тенденції удосконалювання технологій обробки, конструювання інструменту та обладнання, моделювання процессів, діагностики технологічних систем.

Для науковців, викладачів вищих навчальних закладів, промисловців.

У квітні 2013 р. науковий збірник «Сучасні технології в машинобудуванні» включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrisch's Periodicals Directory (New Jersey, USA)

ББК 34.63

© Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», 2016

ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

УДК 621.914

Ю.Н. ВНУКОВ, д-р техн. наук, ***С.И. ДЯДЯ***, канд. техн. наук,
Е.Б. КОЗЛОВА, Запорожье, Украина

ЭВОЛЮЦИЯ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СИЛ ПРИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ОТ СТАТИЧЕСКИХ К ДИНАМИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ ОБРАБОТКИ (часть 1)

У статті розглянуто еволюцію розвитку досліджень по вивченню статичних сил при циліндричному фрезеруванні . Показано, що формули «статичного вигляду» для розрахунку сил не відображають фізичної сутності процесу різання , тому сучасні розрахунки сил ведуть по «структурним формулам» .
Ключові слова: циліндричне фрезерування, статичні сили, процес різання

В статье рассмотрена эволюция развития исследований по изучению статических сил при цилиндрическом фрезеровании. Показано, что формулы «степенного вида» для расчета сил не отражают физической сущности процесса резания, поэтому современные расчеты сил ведут по «структурным формулам».
Ключевые слова: цилиндрическое фрезерование, статические силы, процесс резания

The article describes the evolution of development studies of static forces in a cylindrical milling . It is shown that the formula of "the power of the form" for the calculation of forces does not reflect the physical nature of the cutting process, so modern calculations of forces are on "structural formulas".
Keywords: cylindrical milling, static forces, cutting process

Исследование статических сил при цилиндрическом фрезеровании

В работе инженера Solomona [1] (1928 г.) впервые было представлено аналитическое выражение для затраты энергии при работе цилиндрической фрезы с прямым зубом. По его выводам работа за один оборот фрезы равна:

$$A_n = \frac{2^{k+1}}{k+2} \cdot \lambda_1 \cdot b \cdot t^{\frac{k+2}{2}} \cdot S_n^{k+1} \cdot z^{-k} \cdot D^{-\frac{k}{2}}, \qquad (1)$$

где D – диаметр фрезы, мм;

λ_1 – постоянная величина, зависящая от обрабатываемого материала и профиля зуба фрезы (переднего угла – γ);

b – ширина фрезерования, мм;

t – глубина фрезерования, мм;

S_n – подача в мм за один оборот фрезы;

z – число зубьев фрезы;

k – показатель степени, постоянный для данного обрабатываемого материала.

© Ю.Н. Внуков, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, 2016

В основу вывода было положено переменное удельное давление резания, как функция толщины стружки в данный момент:

$$K_s = \lambda_1 S_e^k = \lambda_1 S_z^k \sin^k \psi \,, \tag{2}$$

где K_s – удельное давление резания, кг/мм^2;

S_e – толщина стружки в данный момент, мм;

k – показатель степени, зависящий от сорта обрабатываемого материала (у Solomona k = – 0,28);

λ_1 – постоянная величина, зависящая от обрабатываемого материала и профиля зуба фрезы (переднего угла – γ);

S_z – подача на зуб, мм/зуб;

ψ – угол, определяющий положение зуба в данный момент.

Переходя к затрате мощности и обозначая через n число оборотов фрезы в минуту, а через $S_{мин}$ минутную подачу Solomon получил:

$$N = \frac{A_n n}{1000 \cdot 60 \cdot 75}, \tag{3}$$

$$N = \frac{2^{k+1}}{k+2} \cdot \frac{n^{-k}}{1000 \cdot 60 \cdot 75} \lambda_1 b t^{\frac{k+2}{2}} S_{мин}^{k+1} z^{-k} D^{-\frac{k}{2}}, \tag{4}$$

При подстановке (k = – 0,28) выражение для мощности фрезерования будет иметь формулу степенного вида:

$$N = \frac{2^{0,72}}{1,72} \cdot \frac{n^{0,28}}{1000 \cdot 60 \cdot 75} 170 b t^{0,86} S_{мин}^{0,72} z^{0,28} D^{-0,14}, \tag{5}$$

Удельное давление резания при фрезеровании стали средней твердости было принято:

$$K_s = \frac{170}{S_e^{0,28}}, \tag{6}$$

Выражение (4) дает среднюю затрату мощности для прямого зуба цилиндрической фрезы. А.М. Розенберг в фундаментальной статье [2] «Теория работы цилиндрической фрезы со спиральным зубом» (1933 г.) на базе вышеизложенного подхода Solomona, опубликовал результаты своих теоретических исследований, а в статье [3] «Работа цилиндрической фрезы» (1936 г.) результаты экспериментальных исследований, на основании которых были сделаны следующие важные выводы:

1. Расход мощности при работе цилиндрической фрезы не зависит от угла подъема – β (наклона – ω) спирали зуба.

2. Окружное усилие P_o на одном спиральном зубе фрезы определяется уравнением:

$$P_o = D\lambda_1 S_z^{k+1} tg\beta \frac{2^{k+1}}{k+2}\left[\sin^{k+2}\left(\frac{\psi_2}{2}\right) - \sin^{k+2}\left(\frac{\psi_1}{2}\right)\right], \quad (7)$$

А в случае если под стружкой будет находиться одновременно m зубьев:

$$\sum_1^m P_o = D\lambda_1 S_z^{k+1} tg\beta \frac{2^{k+1}}{k+2}\sum_1^m\left[\sin^{k+2}\left(\frac{\psi_2}{2}\right) - \sin^{k+2}\left(\frac{\psi_1}{2}\right)\right], \quad (8)$$

Таким образом, в период, начиная с 30-х годов прошлого столетия, развивалось направление определения сил резания при помощи формул *степенного* типа. Одним из основных результатов совершенствования формул *степенного* типа, на тот период, являлось то, что в этих формулах показатели степеней у всех переменных, связанных с размерами срезаемого слоя, получали или равными единице или выраженными через один параметр – ***k***. Так для определения средней суммарной окружной силы резания на цилиндрической фрезе была предложена следующая формула [4]:

$$P_o = \frac{2^{k+1}}{k+2} C_\beta \frac{\lambda}{\pi} BzS_z^{k+1}\left(\frac{t}{D}\right)^{\frac{k+2}{2}} v^u, \quad (9)$$

где C_β – коэффициент, учитывающий влияние угла подъема спирали зуба фрезы;

λ – коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала;

B – ширина фрезерования, мм;

t – глубина фрезерования, мм;

S_z – подача на зуб, мм/зуб;

z – число зубьев фрезы;

D – диаметр фрезы, мм;

v – скорость резания, м/мин;

k – величина отрицательная и дробная, зависящая от свойств обрабатываемого материала, переднего угла, степени затупления зуба фрезы и др.;

u – показатель степени.

Формулы *степенного* вида получили широкое распространение в СССР на базе которых разрабатывали справочные материалы для промышленных

предприятий. В справочнике [5] приведена формула главной составляющей силы резания P_z при фрезеровании:

$$P_z = \frac{10C_p t^x S_z^y B^n z}{D^q n^\omega} k_p, \tag{10}$$

где k_p – обобщенный силовой поправочный коэффициент:

$$k_p = k_\gamma k_{\delta_3}, \tag{11}$$

где k_γ – учитывает влияния переднего угла γ на силу резания;

k_{δ_3} – показывает влияние износа задней поверхности δ_3 на силу резания.

Приведенная формула и таблицы к ней (табл. 1) для различных обрабатываемых материалов и видов фрез позволяет рассчитывать:

– силу, изгибающую фрезу $R = \sqrt{P_r^2 + P_z^2}$;

– крутящий момент $M = \frac{P_z D}{2 \cdot 100}$;

– мощность резания (эффективную) $N_э = \frac{P_z v}{1020 \cdot 60}$,

т.е. параметры, необходимые для выбора инструмента и оборудования при расчете режимов резания.

Составляющие силы резания – сила подачи – P_s, сила отталкивания – $P_{от}$, радиальная сила – P_r и осевая сила – P_x определяют относительно главной составляющей силы P_z и приведены в табл. 2.

Анализ табл. 1 показывает, что в формуле силы P_o для всех видов фрез (концевых, цилиндрических, дисковых, отрезных и прорезных), изготовленных из быстрорежущей стали при обработке конструкционных сталей, ковкого чугуна, медных сплавов, а также алюминиевых сплавов изменяются только значения коэффициента C_p, а все показатели степеней остаются постоянными. Влияние переднего угла – γ и износа зуба фрезы по задней поверхности необходимо учитывать поправочными коэффициентами.

В работе [4] приведены результаты фундаментальных исследований сил при фрезеровании большой группы цветных металлов и сплавов. На рис. 1 и табл. 3 показаны часть полученных результатов.

Установлено, что при фрезеровании латуни ЛС59-1 и дюралюминия Д-1 изменение скорости резания – v несущественно влияет на силы резания и этим

влиянием можно пренебречь. Для латуни Л62 и красной меди (рис. 1, а) по мере увеличения скорости резания силы уменьшаются и в зоне рабочих скоростей остаются неизменными. Для силумина АЛ-10 и АЛ-4 зависимость силы от скорости выражается кривыми, характерными для металлов, при резании которых образуется нарост. Эти результаты свидетельствуют о том, что условия формирования сил резания от скорости обусловливаются процессами, происходящими на передней поверхности зуба фрезы и в зоне стружкообразования.

При изменении переднего угла γ изменяются условия стружкообразования, усадка стружки, а следовательно и силы резания на передней поверхности. Силы на задней поверхности при этом остаются постоянными.

Для малых подач (S_z = 0,02;0,05 мм/зуб) (табл. 1), когда силы на передней поверхности сравнительно невелики по сравнению с силами на задней грани, изменение переднего угла, влияющего только на силы на передней поверхности приводит к очень незначительному изменению суммарной силы. Для подачи S_z = 0,02 мм/зуб изменение γ от 0° до 20° не влияет на величину силы (k_γ =1,0). Для подачи S_z = 0,05 мм/зуб влияние не большое, для латуни k_γ уменьшается от 1,06 до 0,95, а для силумина от 1,1 до 0,9.

При фрезеровании с большими подачами силы на передней поверхности оказываются значительно большими, чем на задней грани и их изменение при постоянстве сил на задней поверхности приводит к существенному уменьшению средней окружной силы по мере роста переднего угла. Для подачи S_z = 0,317 мм/зуб при изменении γ от 0° до 20°, силы существенно уменьшаются. Для латуни k_γ уменьшается от 1,2 до 0,8, а для силумина от 1,27 до 0,73.

Значительное влияние на силы резания при фрезеровании оказывает и износ зубьев фрезы – δ (рис. 1, б). Износ протекает по задним граням. При этом увеличивается площадь контакта зубьев фрезы с поверхностью резания, что приводит к росту сил на задней грани, тогда как силы на передней поверхности остаются практически неизменными.

В результате многолетнего накопления экспериментальных данных делается важный вывод о том, что степенные уравнения не отражают этой характерной особенности изменения сил от износа, так как в них износ учитывается сомножителем k_δ, тогда как правильнее было бы учитывать прирост сил вторым слагаемым. Другими словами уравнение сил резания должно состоять из двух слагаемых: сил, возникающих на передней поверхности и сил возникающих на задней поверхности. Здесь также было отмечено, что при цилиндрическом фрезеровании, когда толщина стружки измеряется сотыми долями миллиметра и доля сил на задней грани в суммарной окружной силе велика, влияние износа на силы резания оказывается еще более существенным.

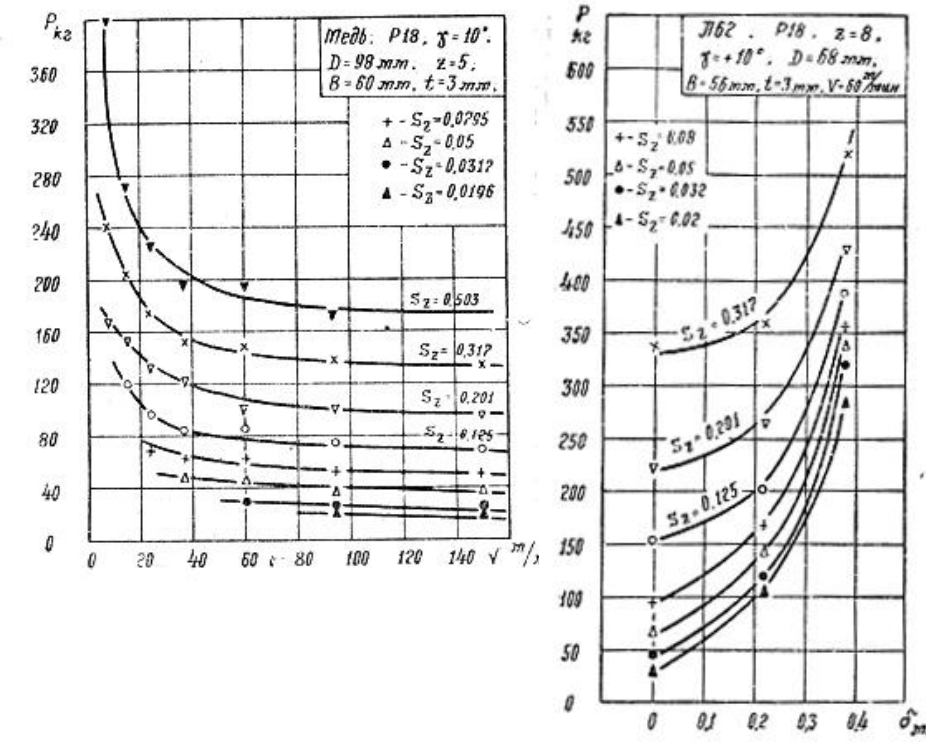
Таблица 1 Значение коэффициента C_p и показателей степеней в формуле окружной силы P_o при фрезеровании [5]

Углеродистая конструкционная (σ = 750 МПа)							
Фрезы	Инструментальный материал	C_p	x	y	n	q	ω
Концевые	Твердый сплав	12,5	0,85	0,75	1,0	0,73	-0,13
	Быстрорежущая сталь	68,2	0,86	0,72	1,0	0,86	0
Цилиндрические	Твердый сплав	101	0,88	0,75	1,0	0,87	0
	Быстрорежущая сталь	68,2	0,86	0,72	1,0	0,86	0
Дисковые, отрезные, прорезные	Твердый сплав	261	0,9	0,8	1,1	1,1	0,1
	Быстрорежущая сталь	68,2	0,86	0,72	1,0	0,86	0
12Х18Н10Т (НВ 141)							
Концевые	Быстрорежущая сталь	82	0,75	0,6	1,0	0,86	0
Серый чугун (НВ 190)							
Цилиндрические	Твердый сплав	54	0,9	0,8	1,0	0,9	0
	Быстрорежущая сталь	30	0,83	0,65	1,0	0,83	0
Дисковые, концевые, прорезные, отрезные	Быстрорежущая сталь	30	0,83	0,65	1,0	0,83	0
Ковкий чугун (НВ 150)							
Цилиндрические, дисковые, концевые, прорезные, отрезные	Быстрорежущая сталь	30	0,86	0,72	1,0	0,86	0
Медные сплавы средней твердости (НВ 100–140)							
Цилиндрические, дисковые, концевые, прорезные, отрезные	Быстрорежущая сталь	22	0,86	0,72	1,0	0,86	0

Примечание: окружную силу P_z для алюминиевых сплавов рассчитывать как для стали с введением коэффициента 0,25. При затуплении фрезы для мягкой стали сила возрастает в 1,75 - 1,9 раза, для других случаев в 1,2 - 1,4 раза.

Таблица 2 – Относительные значения составляющих силы резания при фрезеровании (Фрезы цилиндрические, дисковые, концевые) [5]

Фрезерование	Сила подачи P_s:P_z	Сила отталкивания $P_{от}$:P_z	Радиальная сила P_r:P_z	Осевая сила P_x:P_z
Встречное	1,1 - 1,2	0 - 0,25	0,4 - 0,6	0,2 - 0,4tgω
Попутное	–(0,7 - 0,9)	0,7 - 0,9	0,4 - 0,6	



а б

Рисунок 1 – Влияние скорости резания – *v*, подачи на зуб – S_z
и износа инструмента – δ
на значение окружной силы – *P* при цилиндрическом фрезеровании [4]

Таблица 3 – Поправочные коэффициенты k_γ для различных подач при фрезеровании [4]

Марка металла	Подача S_z, мм/зуб	k_γ		
		$\gamma = 0°$	$\gamma = 10°$	$\gamma = 20°$
Латунь ЛС59-1	0,02	1,0	1,0	1,0
	0,05	1,06		0,95
	0,125	1,1		0,9
	0,317	1,2		0,8
Силумин АЛ-10	0,02	1,0	1,0	1,0
	0,05	1,1		0,9
	0,125	1,13		0,87
	0,317	1,27		0,73

В этот период (70-е годы) происходит принципиальное изменение взглядов на процесс резания и в том числе на силы резания и методы их расчета [6]. Ряд ученых [7, 8] пришли к выводу о непригодности использования для расчетов сил резания эмпирических формул степенного вида. Эти формулы не только не отражают физической сущности процесса резания, но и могут привести к ошибкам расчета достигающим 100–200%. Было показано, что за основу при разработке методов расчета сил резания следует брать положения, выдвинутые еще в 1893 г. К.А. Зворыкиным, что силы резания состоят из двух групп: из сил, действующих на переднюю поверхности инструмента и сил, действующих на его заднюю поверхность. Эти группы сил определяются различными процессами и их закономерностями.

А.М. Розенберг [7] и Н.Н. Зорев [8] независимо друг от друга разработали метод экстраполяции силовой зависимости от толщины срезаемого слоя на нулевую толщину, который позволяет экспериментально измеренную силу резания разделить на силу, действующую на переднюю поверхность и силу, действующую на заднюю поверхность инструмента.

Это позволило экспериментально определить эти силы, произвести исследования и создать методы их расчета. В основу этого метода было взято положение, что силы, действующие на заднюю поверхность при определенных условиях (А.М. Розенберг – при постоянной температуре, Н.Н. Зорев – при постоянной усадке стружки) не зависят от толщины срезаемого слоя.

В основу современных выводов уравнений для расчета сил резания берутся следующие основные положения [9]:

1. Сила резания P раскладывается на две составляющие: силу, совпадающую по направлению с вектором скорости резания P_z и силу, расположенную в плоскости, перпендикулярной к этому вектору P_{xy} (рис. 2).

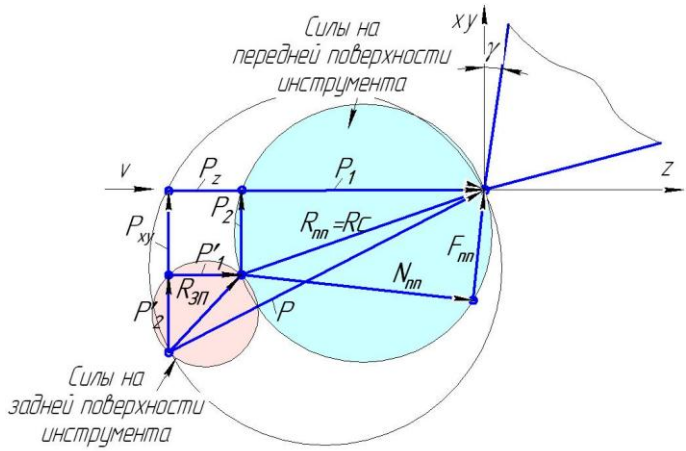


Рисунок 2 – Полная система сил, действующих одновременно на передней поверхности $F_{пп}$, $N_{пп}$ и P_1, P_2, а также на задней поверхности $F_{зп} = P'_1$, $N_{зп} = P'_2$, формирующих технологические составляющие P_z и P_{xy} силы резания P

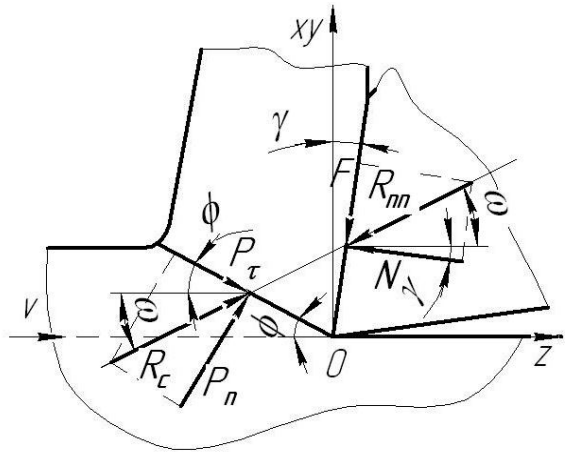


Рисунок 3 – Силы стружкообразования (условие равновесия стружки $R_c = R_{пп}$)

3. Каждая из этих сил состоит из двух частей: составляющей силы, действующей на переднюю поверхность инструмента и составляющей силы, действующей на заднюю поверхность инструмента:

$$P_z = P_1 + P'_1 , \tag{12}$$

$$P_{xy} = P_2 + P'_2 , \tag{13}$$

где P_1, и P_2 – силы на передней поверхности;
P'_1 и P'_2 – силы на задней поверхности.

3. Силы, действующие на переднюю и заднюю поверхность инструмента определяются различными физическими процессами при резании и следовательно подчиняются разным закономерностям. Силы, действующие на переднюю поверхность инструмента связаны с процессами в зоне стружкообразования и процессами в зоне контакта стружки с передней поверхностью инструмента, рис. 3. Силы, действующие на заднюю поверхность инструмента, определяются процессами в зоне контакта задней поверхности с поверхностью резания рис. 4. Соответственно формулы для определения сил, действующих на переднюю и заднюю поверхности инструмента, будут отличаться друг от друга и выводы этих формул должны быть выполнены отдельно.

Таким образом, был предложен новый подход расчета сил резания с использованием понятий удельных сил, действующих на передней и задней поверхности независимо друг от друга, так называемые «*структурные формулы*» [10].

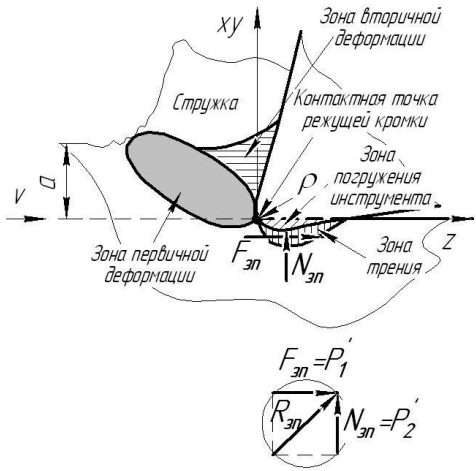


Рисунок 4 – Система сил, действующих на заднюю поверхность инструмента

Если формулы составляющих силы резания представляют собой сумму сил на передней и задней поверхности (12, 13) (рис. 2).

$$P_z = P_1 + P'_1 ,$$

$$P_{xy} = P_2 + P'_2 ,$$

где P_1, и P_2 – силы на передней поверхности;

P'_1 и P'_2 – силы на задней поверхности,

то расчет значений этих составляющих силы резания можно выразить через удельные силы формулами:

$$P_z = C_{ПП} ab + C_{ЗП} \sum l_{xy} , \quad (14)$$

$$P_{xy} = U_{ПП} ab + U_{ЗП} \sum l_{1Pxy} , \quad (15)$$

где $C_{пп}$ и $U_{пп}$ – удельные силы на передней поверхности;

$C_{зп}$ и $U_{зп}$ – удельные силы на задней поверхности;

ab – площадь среза, a и b – толщина и ширина среза;

$\sum l_{xy}$, $\sum l_{1Pxy}$ – проекции суммарной длины рабочих частей режущих кромок на плоскость, перпендикулярную направлению, в котором определяется величина силы.

Удельные силы рассчитываются по формулам (16), (17), (18), (19) [9].

$$C_{ПП} = \tau_p (\varepsilon + 1) , \quad (16)$$

$$\mathrm{U}_{ПП} = \tau_p (\varepsilon + 1) tg\omega , \quad (17)$$

$$C_{ЗП} = 1{,}5\tau_p \varepsilon\rho + \mu_1 \sigma_T h_3 , \quad (18)$$

$$U_{ЗП} = 1{,}5\tau_p \rho(3{,}17\varepsilon + 1) tg\omega + \sigma_T h_3 , \quad (19)$$

где τ_p – касательное напряжение вдоль условной плоскости сдвига;

ε – относительный сдвиг;

ω – угол действия;

ρ – радиус округления режущей кромки;

μ_1 – коэффициент трения на задней поверхности;

σ_T – предел текучести обрабатываемого материала;

h_3 – ширина площадки износа на задней поверхности.

Таким образом, сила на передней поверхности равна произведению удельной силы на передней поверхности на площадь срезаемого слоя, а сила на задней поверхности равна произведению удельной силы на задней

поверхности на проекцию рабочей длины режущих кромок на плоскость перпендикулярную определяемой силе. Площадь срезаемого слоя и рабочие длины режущих кромок определяются геометрической спецификой каждого вида обработки. [9].

Анализ формул (16), (17), (18), (19) для расчета удельных сил резания показывает, что в них учтено влияние механических свойств обрабатываемого материала, условий несвободного и косоугольного резания, состояние износа режущего инструмента и др. Однако, в них отсутствуют такие параметры условий резания как передний угол, скорость резания, форма передней поверхности и др. т. е. те параметры, которые влияют на силы резания через степень деформации металла стружки.

Очень важным положением является то, что эти удельные силы для различных видов обработки (точение, сверление, фрезерование и др.) при одинаковых условиях взаимодействия режущего клина инструмента с обрабатываемым материалом (ε, $\sigma_в$, δ, $\sigma_т$, γ, φ, ρ, $h_З$ и др.) имеют одинаковые значения [10].

Еще одним преимуществом аналитических уравнений *структурного* типа является их дифференцируемость, т. е. возможность с помощью тех же констант описывать не только общие значения сил, но и их различные распределения по ширине фрезерования и по времени работы зуба фрезы (угла поворота). В настоящее время разработаны теоретические формулы для расчета мгновенных и средних сил при цилиндрическом фрезеровании фрезами с винтовыми режущими зубьями, в которых за основу приняты удельные силы, действующие на передней и задней поверхности зуба фрезы [11, 12, 13].

Современный алгоритм расчета сил при концевом цилиндрическом фрезеровании по статической дискретной модели представлен в работе [11] и приведен на рис. 5.

Для вычисления сил используют прием дискретизации режущей части фрезы. Зуб фрезы разбивают на участки *db* режущей кромки и интервалы изменения толщины среза при изменении угла поворота φ.

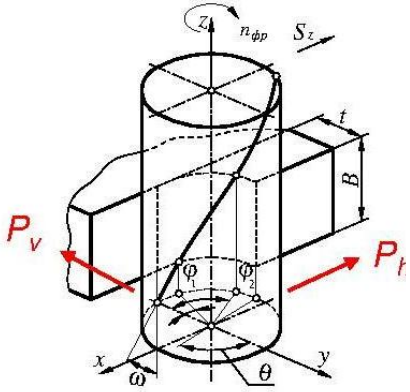
Дальнейшая последовательность расчета состоит из следующих этапов:

1. Определение нормальных сил N_{1pm}, N_{2pm} и сил трения F_{1pm}, F_{2pm} на передней и задней поверхностях.
2. Определение радиальной P_{rmp} и тангенциальной P_{tmp} сил на m-участке зуба фрезы, p-го дискретного перемещения.
3. Определение силы подачи P_{hpm} и силы отжима P_{vpm} на m-участке зуба фрезы, p-го дискретного перемещения.
4. Определение результирующей силы подачи Php и отжима Pvp в момент p-го дискретного перемещения на отдельном зубе.

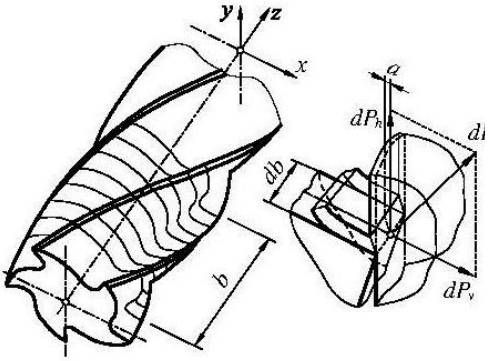
Сравнение расчетных и экспериментально измеренных технологических составляющих силы резания приведены на рис. 6 [11] (2003 г.). В работе [12]

(2011) при расчете сил резания учтены: влияние угла наклона винтовой режущей кромки зуба фрезы – ω на изменение условий трения на передней поверхности и условий деформирования в плоскости сдвига, влияние перехода от процесса пропахивания до возникновения и дальнейшего снятия стружки на задней поверхности, а также влияния угла наклона свободной поверхности срезаемого слоя – ξ на изменение угла наклона плоскости сдвига – ϕ. Сравнение расчетных и экспериментальных измерений сил резания приведены на рис. 7 [12].

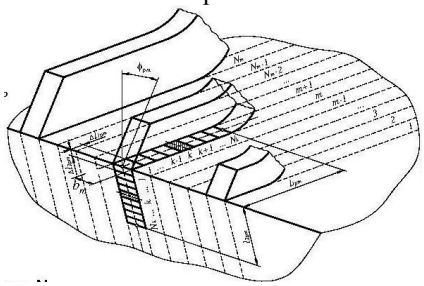
1. Схема фрезерования



2. Дискретизация режущей части



3. Разбивка зуба фрезы на участки и интервалы



4. Расчетная схема сил на m-участке в момент p-перемещения

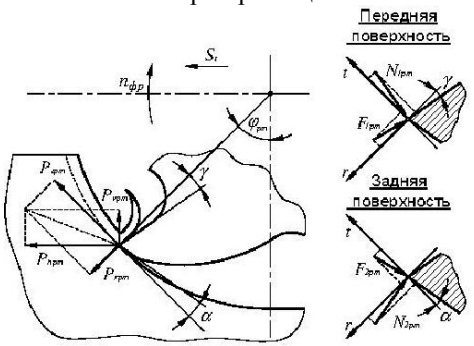


Рисунок 5 – Последовательность современного расчета сил при концевом цилиндрическом фрезеровании по статической дискретной модели [11] (2004)

Приведенные на рис. 6 и рис. 7 результаты позволяют утверждать, что в настоящее время хорошо изучена физическая модель возникновения сил резания в статических условиях (т. е. в условиях, построенных на равновесии стружки между передней поверхностью и зоной сдвига) с учетом их независимого действия на переднюю и заднюю поверхность инструмента, а также разработаны формулы и алгоритмы расчета их мгновенных и средних значений с высоким уровнем точности.

Учет изменения суммарной площади сечения среза и суммарной длины активной кромки в расчетных формулах позволяет вычислять колебания технологических составляющих вынуждающей силы фрезерования за один оборот фрезы или по длине контакта на отрезных фрезах. [13].

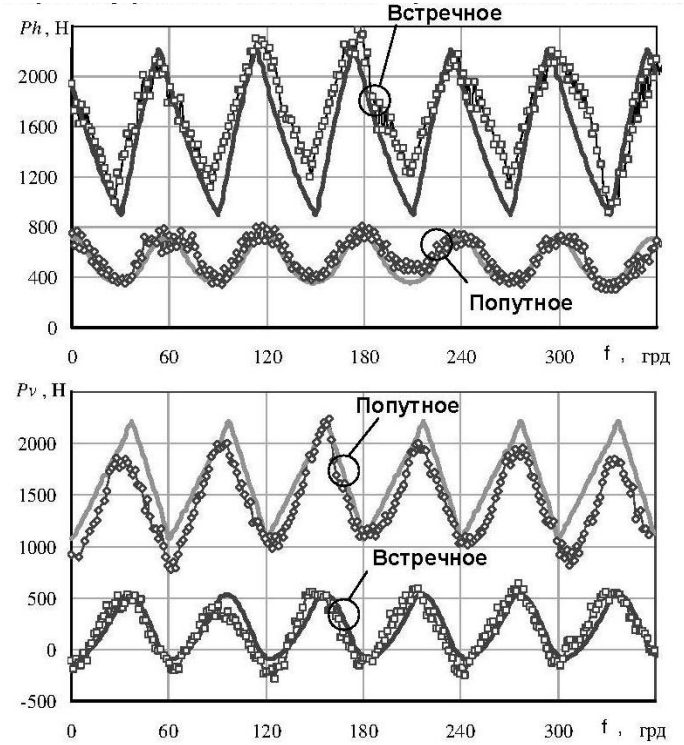


Рисунок 6 – Сравнение экспериментальных измерений с результатами аналитического расчета сил при контурном цилиндрическом фрезеровании [11].
Условия фрезерования: Сталь 45, Р6М5, ∅24 мм, z = 6, ω = 20°, t = 5мм, b=20 мм, Sz = 0,03 мм/зуб, v = 18,84 м/хв, n = 250 об/мин).
Динамометр УДМ–600, средние значения 10–20 оборотов.
P_h – сила подачи, P_v – сила отжима

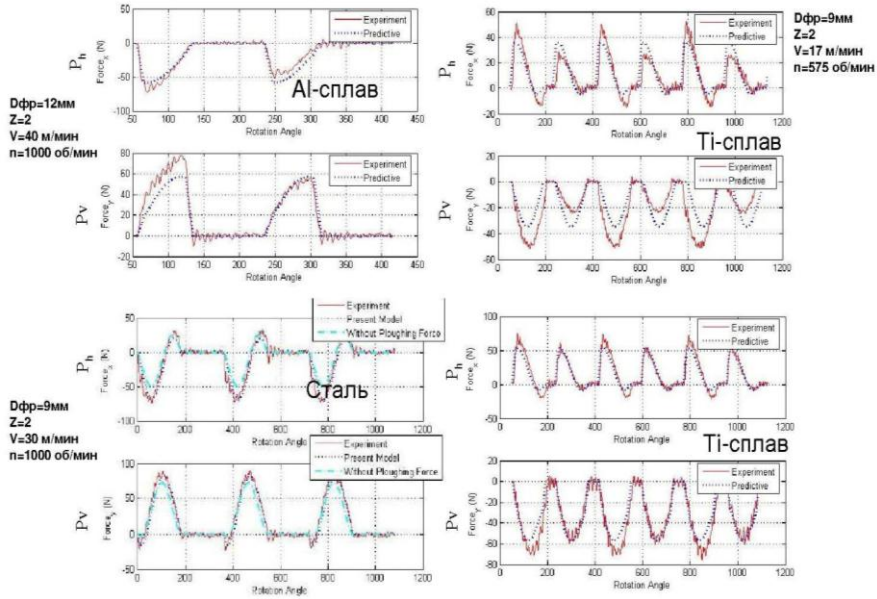


Рисунок 7 – Сравнение экспериментальных измерений
с результатами аналитического расчета сил
при концевом цилиндрическом фрезеровании [12] (2011).
Измерительная аппаратура: Пьезоэлектрический динамометр с фильтрацией
низких частот до 200 Гц, частота дискретизации записи $(1–2,5)\cdot10^4$ 1/с.
P_h – сила подачи, P_v – сила отжима

Однако, учет только переменных значений вынуждающей силы резания при фрезеровании не позволяет исследовать причину и механизм возбуждения автоколебаний, вызывающих возникновение вибраций, так как в рассмотрении отсутствует упругая система (СПИД), которая определенным образом реагирует на прилагаемые к ней силы резания. (см. часть 2).

Выводы:

1. Подробно рассмотрена эволюция развития исследований по изучению сил при цилиндрическом фрезеровании. Показано, что «формулы степенного вида» для расчета сил, не отражают физической сущности процесса резания, поэтому в промышленно развитых странах, начиная с 60-х годов, расчеты сил ведут по «структурным формулам», в которых силы рассматривают как сумму нагрузок, действующих независимо на переднюю и заднюю поверхности инструмента.

Современные алгоритмы расчета средних значений всех составляющих силы резания уже хорошо разработаны, используются в промышленности для всех видов обработки и не требуют дальнейших уточнений для повышения точности.

2. Знания только о величине составляющих силы резания не позволяет рассматривать причины и механизмы возбуждения различных по своей природе колебаний, возникающих в зоне обработки. Необходима дополнительная информация о свойствах упругой системы СПИД, которая определенным образом реагирует на прилагаемую к ней силу резания. Совместное рассмотрение воздействия силы резания и реакции упругой системы СПИД на это воздействие является основой динамики процесса резания.

Список использованных источников: 1. *Salomon C*. Zur theorie des Fräsvorgandes, Z. Ver. Deut. Ing., 1928, P. 1619–1624 **2.** *Розенберг А. М.* Теория работы цилиндрической фрезы со спиральным зубом / *А. М. Розенберг, В. В. Суднишников* // Вестник металлопромышленности, 1933. №4, С.36–48. **3.** *Розенберг А. М.* Работа цилиндрической фрезы / *А. М. Розенберг* // Известия Томского индустриального института [Известия ТИИ]. – 1936. – Т. 55, [Вып. 1–3]. – С. 128-165. **4.** Исследование сил резания при фрезеровании цветных металлов / *А. М. Розенберг [и др.]* // Известия Томского политехнического института [Известия ТПИ]. – 1965. – Т. 133. – [С. 129-141]. **5.** Справочник технолога–машиностроителя [В 2–х т.] / Под ред.. *А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова.* – 4–е узд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1986. 496 с. **6.** Розенберг А.М. Новые зависимости для расчета сил при фрезеровании / А.*М. Розенберг, Г.Л. Куфарев, Ю.А. Розенберг* // Обрабатываемость жаропрочных и титановых сплавов.: Сб. докл. межвуз. ВНТК. Куйбышев, 1963. С. 78 – 92. **7.** *Розенберг А. М.* Определение сил на задней грани резца. Сборник Зап. Сиб. филиала АН СССР. «Вопросы машиноведения и машиностроения» Новосибирск, 1941. **8.** *Зорев Н.Н.* Вопросы механики процесса резания металлов / *В. В. Зорев*. – М. Машгиз, 1956. – 368 с. **9.** *Розенберг Ю.А.* Резание материалов: Учебник для техн. вузов / *Ю. А. Розенберг*. – Курган: Изд–во ОАО «Полиграфический комбинат» Зауралье, 2007. – 294 с. **10.** *Розенберг Ю.А.* Силы резания и методы их определения : учеб. пособие : [В 2 ч.] / *Ю. А. Розенберг, С. И. Тахман* : Кург. машиностроит. ин–т. – Курган : КМИ, 1995. – 103 с. **11.** *Крыжановский С. А.* Прогнозування параметрів процесу контурної обробки кінцевими фрезами на основі моделювання процесу різання та точності обробки : автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти» / *С. А. Крыжановски*й – Киев, 2005. – 22 с. **12.** *Zou G.* An integrated model for force prediction in peripheral milling operations : A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in The Faculty of Graduate Studies (Mechanical Engineering), the university of British Columbia (Vancouver), 2011, 229 p. **13.** *Панчук В. Г.* Теоретичні основи проектування відрізних фрез : автореф. дис... д–ра техн. наук: 05.03.01 / *В. Г. Панчук*; Нац. техн. ун–т України "Київ. політехн. ін–т". – К., 2009. – 36 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Salomon C*. Zur theorie des Fräsvorgandes, Z. Ver. Deut. Ing., 1928, P. 1619–1624 **2.** *Rozenberg A. M.* Teoriya raboty cilindricheskoj frezy so spiral'nym zubom / *A.M. Rozenberg, V.V. Sudnishnikov* // Vestnik metallopromyshlennosti, 1933. №4, P.36-48. **3.** *Rozenberg A.M.* Rabota cilindricheskoj frezy / *A. M. Rozenberg* // Izvestiya Tomskogo industrial'nogo instituta [Izvestiya TII]. – 1936. – T. 55, [Vyp. 1-3]. – P. 128-165. **4.** Yssledovanye syl rezanyya pry frezerovanyy tsvetnыkh metallov / *A. M. Rozenberh [y dr.]* // Yzvestyya Tomskoho polytekhnycheskoho ynstytuta [Yzvestyya TPY]. – 1965. – T. 133. – [P. 129-141]. **5.** Spravochnyk tekhnoloha–mashynostroytelya [V 2-kh t.] / Pod red.. *A. H. Kosylovoy* y *R. K. Meshcheryakova*. – 4-e uzd., pererab. y dop. – M. : Mashynostroenye, 1986. 496 p. **6.** *Rozenberg A. M.* Novye zavisimosti dlya

rascheta sil pri frezerovanii / *A. M. Rozenberg, G. L. Kufarev, YU. A. Rozenberg* // Obrabatyvaemost' zharoprochnyh i titanovyh splavov.: Sb. dokl. mezhvuz. VNTK. Kujbyshev, 1963. P. 78 – 92. **7.** *Rozenberg A. M*. Opredelenie sil na zadnej grani rezca. Sbornik Zap. Sib. filiala AN SSSR. «Voprosy mashinovedeniya i mashinostroeniya» Novosibirsk, 1941. **8.** *Zorev N. N.* Voprosy mekhaniki processa rezaniya metallov / *V. V. Zorev*. – M. Mashgiz, 1956. – 368 p. **9.** *Rozenberg YU.*A. Rezanie materialov: Uchebnik dlya tekhn. vuzov / *YU. A. Rozenberg*. – Kurgan: Izd–vo OAO «Poligraficheskij kombinat» Zaural'e, 2007. – 294 p. **10.** *Rozenberg YU.* A. Sily rezaniya i metody ih opredeleniya : ucheb. posobie : [V 2 ch.] / *YU. A. Rozenberg, S. I. Tahman* : Kurg. mashinostroit. in–t. – Kurgan : KMI, 1995. – 103 p. **11.** *Kryzhanovskij S. A.* Prognozuvannya parametriv procesu konturnoї obrobki kincevimi frezami na osnovi modelyuvannya procesu rizannya ta tochnosti obrobki : avtoref. dis. na soiskanie nauchn. stepeni kand. tekhn. nauk: spec. 05.03.01 «Procesi mekhanichnoї obrobki, verstati ta instrumenti» / *S. A. Kryzhanovskij* – Kiev, 2005. – 22 p. **12.** *Zou G*. An integrated model for force prediction in peripheral milling operations : A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in The Faculty of Graduate Studies (Mechanical Engineering), the university of British Columbia (Vancouver), 2011, 229 p. **13**. *Panchuk V. G*. Teoretichni osnovi proektuvannya vidriznih frez : avtoref. dis... d–ra tekhn. nauk: 05.03.01 / *V. G. Panchuk*; Nac. tekhn. un–t Ukraïni "Kiïv. politekhn. in–t". – K., 2009. – 36 p.

УДК 621.914

Ю.Н. ВНУКОВ, д-р техн. наук, ***С.И. ДЯДЯ***, канд. техн. наук,
Е.Б. КОЗЛОВА, Запорожье, Украина

ЭВОЛЮЦИЯ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СИЛ ПРИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ОТ СТАТИЧЕСКИХ К ДИНАМИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ ОБРАБОТКИ (часть 2)

У статті показано , що при вивченні динаміки процесів різання необхідно враховувати не тільки сили різання , але і структурні властивості як інструменту , так і оброблюваної деталі . Проведено аналіз методів дослідження вібрацій. Описано пристрої, що дозволяють спостерігати умови появи , розвитку і виродження автоколивань.
Ключові слова: динаміка процесів різання, методи дослідження вібрацій, автоколивання

В статье показано, что при изучении динамики процессов резания необходимо учитывать не только силы резания, но и структурные свойства как инструмента, так и обрабатываемой детали. Проведен анализ методов исследования вибраций. Описаны устройства, позволяющие наблюдать условия появления, развития и вырождения автоколебаний.
Ключевые слова: динамика процессов резания, методы исследования вибраций, автоколебания

The article shows that the study of the dynamics of cutting process should take into account not only the cutting force , and structural properties as a tool and the workpiece . The analysis of vibration research methods . We describe the device , allowing to observe the conditions of the emergence , development and degeneration of oscillation .
Keywords: dynamics of cutting process, vibration research methods, oscillation

В обзоре J. Tlusty [1], одного из основоположников рассмотрения процесса резания в сочетании со свойствами упругой системы СПИД, приведена наглядная схема, рис. 1, возбуждения автоколебательного процесса при резании, на которой силы резания (F_1 и F_2) действуют на систему СПИД, условно показанную в виде упругого замкнутого контура – *s*. Процесс резания (Cutting process) и упругая система СПИД (Machine structure) в процессе обработки создают колебательный контур, в котором силе резания *F* противостоит реакция упругой системы Y. Таким образом, если при изучении сил резания в рассмотрение вводится и перемещение упругой системы СПИД, то задача из статической становится динамической.

1. Исследование динамики цилиндрического фрезерования

Под динамическим понимают такое воздействие сил на тело, которое вызывает его движение. В случае воздействия сил резания на упругие тела (инструмент и (или) деталь) возникает их движение, т. е. колебания.

© Ю.Н. Внуков, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, 2016

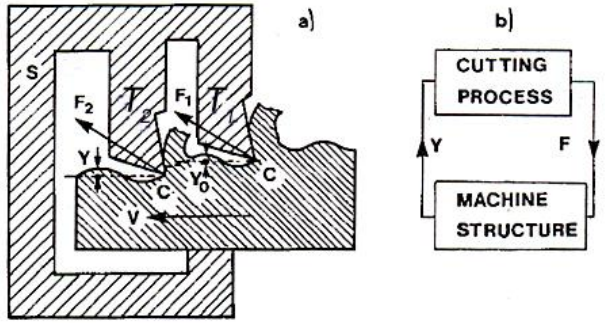


Рисунок 1 – Связь упругой системы СПИД и процесса резания [1]

Таким образом, если при рассмотрении статических условий фрезерования (рис. 2) объектом рассмотрения являются только силы резания, то при динамических условиях фрезерования (рис. 3) объектом рассмотрения являются воздействие и взаимовлияние силы резания P и перемещения (колебания) $y(t)$ детали относительно установленного припуска, равного – a_e. В данном случае сила отталкивания P_y является возмущающей силой, приводящей в движение (смещение) деталь, на которую она воздействует. Простейшая динамическая модель с одной степенью свободы приведена на рис. 4 – груз на пружине и демпфер.

Приложенная к массе сила $F(t)$ вызывает на выходе системы смещение $y(t)$. Формула (1) связывает все виды сил, действующих на упругую систему:

$$m\frac{d^2y(t)}{dt}+c\frac{dy(t)}{dt}+ky(t)=F(t)\,, \qquad (1)$$

где $m\dfrac{d^2y(t)}{dt}$ – инерционная сила;

$c\dfrac{dy(t)}{dt}$ – сила демпфирования;

$ky(t)$ – сила упругости;

$F(t)$ – сила резания при удалении припуска (возмущающая сила).

Колебательная система включает груз массой m и упругий элемент, имеющий в направлении перемещения жесткость k. Отклонившись от

равновесного положения, масса совершает периодические свободные колебания с собственной частотой колебательной системы – ω_c:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{k}{m}}, \tag{2}$$

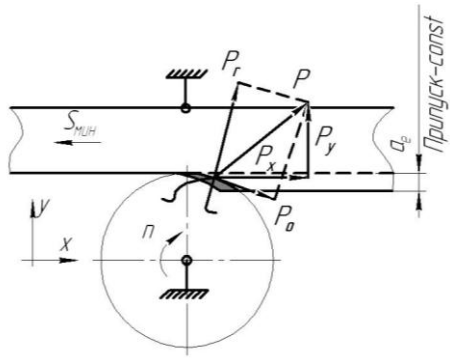


Рисунок 2 – Статическая схема цилиндрического фрезерования

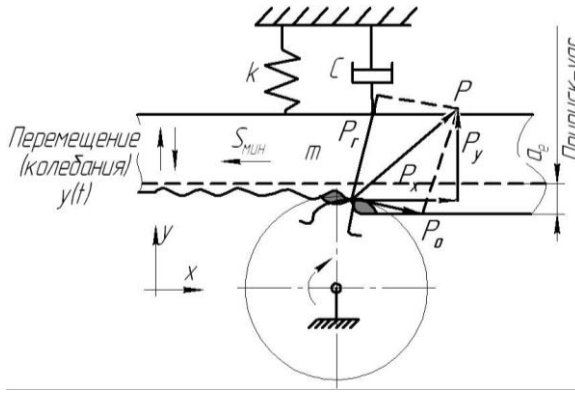


Рисунок 3 – Динамическая схема цилиндрического фрезерования с одной степенью свободы по оси у

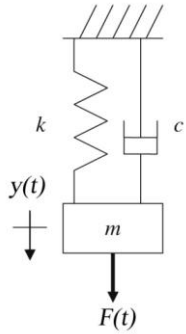


Рисунок 4 – Колебательная система с одной степенью свободы

При действии трения или демпфирования свободные колебания затухают. Демпфирование характеризуется коэффициентом, который называется логарифмическим декрементом затухания. В обычных системах этот коэффициент положителен.

Однако когда в ряде случаев возникает особый механизм колебаний, при которых колеблющаяся система черпает из среды, в которой происходят колебания (в нашем случае из зоны резания) дополнительную энергию, коэффициент демпфирования становится отрицательным и колебания во времени нарастают. Стабилизируются они на достаточно высоком уровне. Такие колебания называются самовозбуждающимися или автоколебаниями.

Таким образом, в колебательной системе тела массой m, жесткостью k и коэффициентом демпфирования – C могут возникать свободные колебания с собственной частотой – ω_c, вынужденные колебания с частотой воздействия возмущающей силы – $\omega_{вын}$ и самовозбуждающиеся колебания с частотой автоколебаний – $\omega_{авт}$.

Поэтому при изучении динамики процессов резания исследуют не одну, а две проблемы [2]:

1. Модель силы резания.
2. Амплитудно –частотную характеристику колебания режущей кромки инструмента относительно удаляемого припуска.

Конечной целью динамических исследований является определение условий обработки, при которых можно уменьшить колебания до допустимого уровня.

В условиях концевого цилиндрического фрезерования всегда присутствуют вынужденные колебания, связанные с действием возмущающей силы со стороны зуба фрезы при врезании, резании и выходе из–под стружки. Во многих случаях особенно при срезании припуска с малыми радиальными и осевыми глубинами наблюдаются свободные

колебания детали и инструмента, во время холостого хода между соседними зубьями. А также, могут возбуждаться автоколебания из–за появления волнистого следа на поверхности резания и свободной поверхности стружки от прохода предыдущего зуба.

Модель динамической силы резания при фрезеровании отличается от статической введением в расчет изменения толщины срезаемой стружки из–за волн, оставляемых в результате регенеративных автоколебаний. Рис. 5.

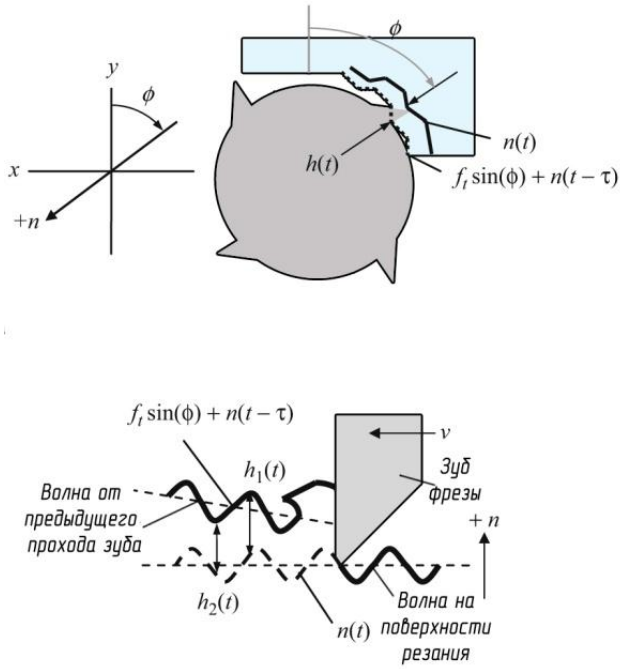


Рисунок 5 – К расчету толщины среза при цилиндрическом фрезеровании в условиях регенеративных автоколебаний [3]

В этом случае толщину среза можно записать выражением 3 [3]:

$$h(t) = f_t(\sin\varphi) + n(t-\tau) - n(t), \qquad (3)$$

где $f_t(\sin\varphi)$ – толщина среза в зависимости от угла поворота зуба фрезы ϕ и подачи на зуб f_t . Эту зависимость используют при расчете статической силы;

$n(t-\tau)-n(t)$ – изменение толщины среза в результате наложения волн от предыдущего и настоящего проходов зуба фрезы;

n – направление перпендикуляра к толщине среза.

$$n = x\sin\varphi - y\cos\varphi \tag{4}$$

τ – период зубцовой частоты, равный:

$$\tau = \frac{60}{\Omega N_t}, \tag{5}$$

где Ω – частота вращения шпинделя, об/мин;

N_t – количество зубьев фрезы.

В зарубежной литературе хорошо представлены алгоритмы расчета динамических сил резания [2, 3, 4], с учетом регенеративных автоколебаний, изменяющих толщину среза.

Несмотря на значительные успехи в изучении динамики резания, однако, и сегодня остается открытым вопрос, каким образом зона стружкообразования и контактные поверхности инструмента оказывают влияние на характеристики демпфирования автоколебаний.

В 80-х годах прошлого столетия в рамках программы CIRP под руководством J. Tlusty [1] в ряде ведущих лабораторий Великобритании, США, Германии и Чехии были проведены исследования по изучению влияния условий резания на возникновение автоколебаний (chatter). Исследования проводили при помощи анализа значений (DCFC) – динамических коэффициентов силы резания.

Были разработаны различные методики исследований, в которых искусственно создавали колебания режущей кромки инструмента относительно снимаемого припуска. Получено много полезных результатов, особенно о роли радиуса округления режущей кромки, площадки износа по задней поверхности, комплексного влияния скорости и толщины среза при резании различных материалов. Была дана положительная оценка возможности подавления автоколебаний в результате применения многозубых инструментов с нерегулярным шагом, изменяющимися углами наклона винтового зуба, синусоидальной режущей кромкой. Подробно рассмотрено изменение рабочих углов (переднего и заднего) и условий контактирования задней поверхности при прохождении режущего лезвия по волновому следу на поверхности резания. Рис. 6. В этом случае при движении инструмента в позиции B передний угол становится максимальным γ_{max}, а задний минимальным α_{min}, а в позиции D наоборот γ_{min} , а α_{max}.

Но, так как, все исследования [1] проводили только при точении быстрорежущим инструментом (ограничение по скоростям резания и

попадание в скоростную зону наростообразования), без строго учета условий износа инструмента и изменении толщины среза, то в задачах для будущего изучения автоколебаний определялась необходимость:

1. Исследовать в качестве инструментального материала твердый сплав.
2. Провести широкие исследования для процессов концевого фрезерования и развертывания.
3. Создать новые методики исследования автоколебательного процесса при резании, с помощью которых возможно оценивать влияние различных условий обработки на подавление вибраций.
4. Уделять особое внимание процессу формирования стружки и роли износа инструмента.

За последние десятилетия на промышленных предприятиях появились фрезерные станки с высокоскоростными шпинделями, позволяющие вести обработку до 20000 об/мин и выше.

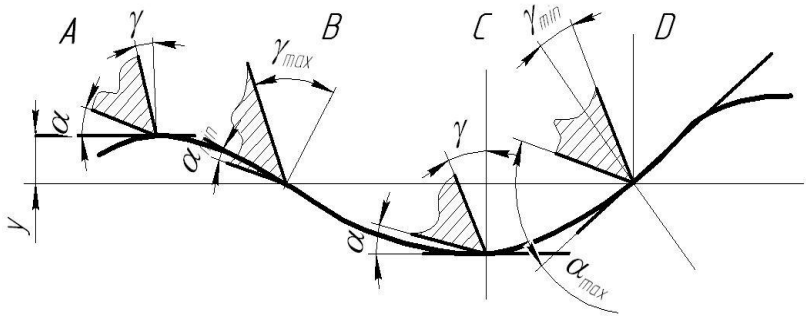


Рисунок 6 – Геометрия взаимодействия режущего лезвия «wave cutting» (волной на поверхности резания) [1]

Практика их применения показала, что с изменением частоты вращения шпинделя появляются зоны повышенных вибраций, которые можно определять с помощью «лепестковых диаграмм», рис. 7. Значительное количество зарубежных исследований в последнее время посвящается вопросам разработки расчетных методов определения зон устойчивости [2-6 и др] с помощью «лепестковых диаграмм». В основе этих расчетов принимают введенное ранее понятие о причине возникновения автоколебаний, как результата резания по предыдущему вибрационному следу.

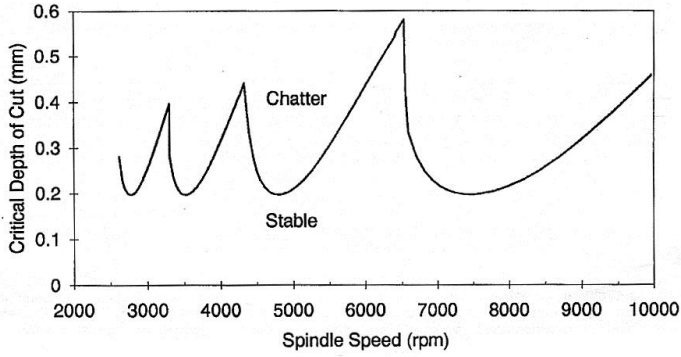


Рисунок 7 – Лепестковая диаграмма устойчивости процесса концевого фрезерования

Однако в работе Логоминова В.А. [7] (2013 г.) экспериментально показано, что при фрезеровании тонкостенной детали с увеличением частоты вращения шпинделя (об/мин), причиной возникновения отклонения детали могут служить совершенно разные механизмы их возбуждения. Рис. 8.

При $n_{фр}$ = 224 об/мин осциллограмма отклонения детали от положения равновесия носит периодический характер вынужденных колебаний, характеризуя величину вынуждающей силы P_y. в направлении Y (см. рис. 3).

Однако с увеличением частоты вращения фрезы до $n_{фр}$ = 560 об/мин на вынужденные колебаний начинают накладываться регенеративные автоколебаний, которые существенно ухудшают качество обработанной поверхности, вызывая появление регулярной волнистости. На осциллограммах также появляются и свободные колебания детали.

При дальнейшем увеличении частоты вращения регенеративный эффект постепенно вырождается и исчезает и при $n_{фр}$ = 1800 об/мин на осциллограммах отклонения детали видны только вынужденные колебания во время действия силы P_y.и свободные колебания детали с собственной частотой. Причиной появления периодических колебаний силы отжима детали в данном случае является периодическое изменение расположения точки врезания A зуба фрезы в обрабатываемую деталь. Причем при контакте зуба фрезы в точке A с максимальным отклонением обрабатываемой поверхности – Δ возникает наибольшее значение максимальной силы отжима.

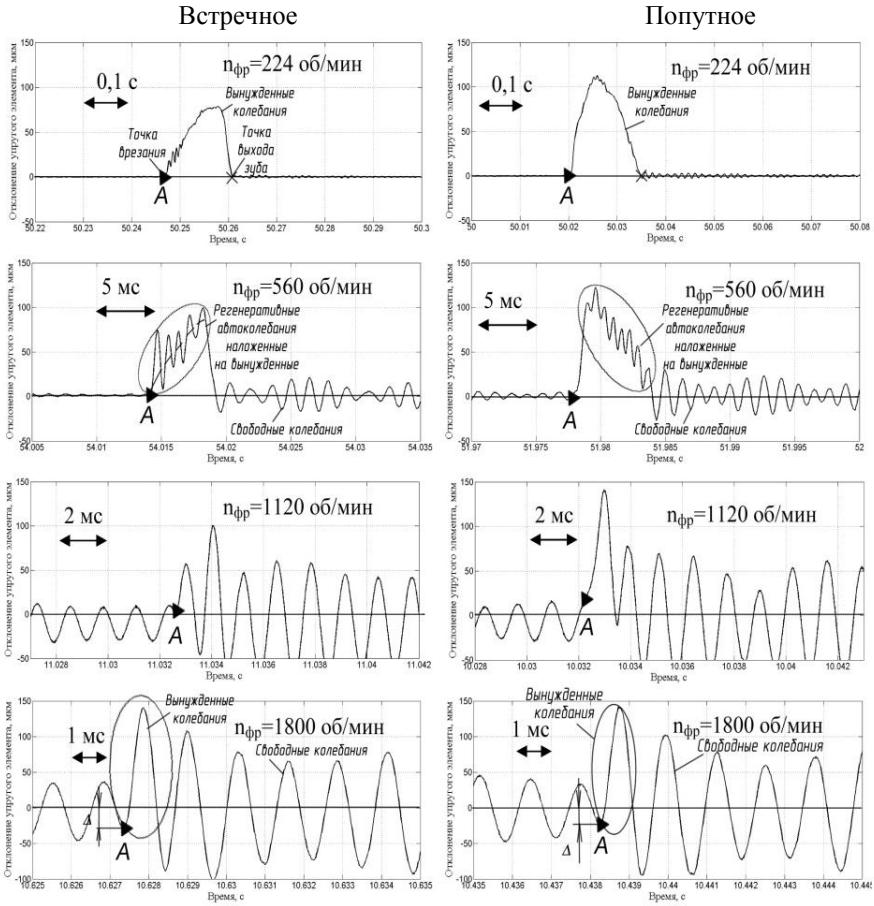


Рисунок 8 – Осциллограммы отклонения тонкостенной детали при различных частотах вращения фрезы (S_z = 0,05 мм/зуб, a_p = 3,4 мм, a_e = 0,5 мм) [7]:
►A – точка врезания зуба фрезы в деталь

Таким образом, установлено, что на традиционном фрезерном оборудовании (до 2000 об/мин) основной причиной возникновения вибраций являются автоколебания, наложенные на вынужденные колебания. На современном оборудовании с высокоскоростным шпинделем могут наблюдать как смешанные вибрации, состоящие из вынужденных колебаний на которые накладываются автоколебания, так и просто вынужденные колебания от врезания зуба фрезы в свободно колеблющуюся деталь.

В табл. 1 приведены материалы многих исследований [8-10 и др.], из которых можно видеть, что изменение различных условий резания не всегда аналогичным образом влияет на силу резания P и амплитуду автоколебаний A.

Увеличение скорости вращения шпинделя показывает существование нескольких зон, в которых возбуждение вибраций активизируется, несмотря на малое монотонное уменьшение и стабилизацию силы резания P. Автоколебания возбуждаются в определенной скоростной зоне и с увеличением скорости вращения шпинделя вырождаются.

При рассмотрении влияния других условий обработки на изменение силы резания P и амплитуды автоколебаний A при скорости возбуждения автоколебаний (v_2) можно отметить следующее:

– С увеличением глубины резания (t) (ширины среза – b) сила резания P увеличивается пропорционально, увеличивается и интенсивность автоколебаний –амплитуда A.

– С увеличением подачи на зуб (S_z) (толщина среза – a) сила резания увеличивается, а интенсивность автоколебаний снижается.

– С увеличением положительного переднего угла (γ) снижается и сила резания и интенсивности автоколебаний.

– С увеличением заднего угла (α) незначительно уменьшается сила резания, но увеличивается амплитуда колебаний.

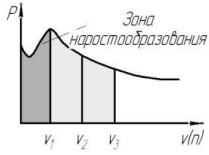
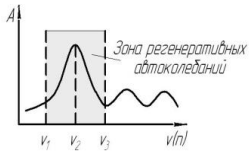
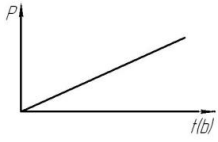
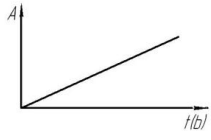
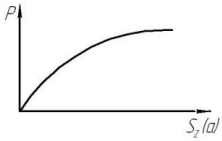
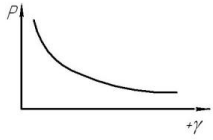
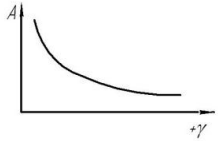
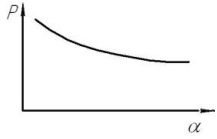
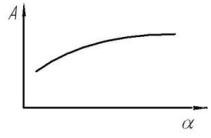
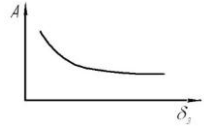
– Величина износа по задней поверхности увеличивает силу резания, но способствует уменьшению амплитуды автоколебаний.

– Увеличение угла наклона режущей кромки λ (ω) незначительно изменяет силу резания, однако положительно влияет на гашение автоколебаний. Уровень влияния угла наклона режущей кромки – ω при различных направлениях подачи (встречное или попутное) на подавление вибраций требует более тщательного изучения. Многими зарубежными фирмами начато производство цилиндрических фрез с незначительным (2-3°) отличием в углах наклона соседних режущих зубьев $\Delta\omega$, рекламирующих для этой конструкции фрез значительный эффект в подавлении вибраций.

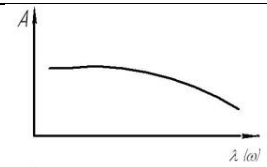
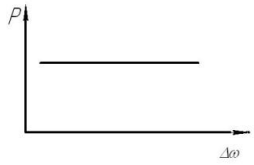
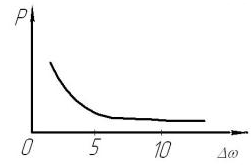
2. Анализ современных методик исследования вибраций при фрезеровании

Ранее отмечалось, что при фрезеровании могут наблюдаться несколько видов колебательного движения. Вынужденные колебания возникают всегда при входе зуба под стружку и выходе зуба из–под стружки. Вынужденные колебания происходят с «зубцовой» частотой, но если ось фрезы не совпадает с осью вращения шпинделя или вершины зубьев фрезы после заточки не лежат на окружности, то наблюдается дополнительное биение с «оборотной» частотой.

Таблица 1 – Влияние основных режимов резания и геометрии концевой цилиндрической фрезы на силу резания *P* и амплитуду *A* регенеративных автоколебаний

Условия резания	Влияние условий резания на силу резания *P(н)*	Влияние условий резания на амплитуду регенеративных автоколебаний *A*
1	2	3
Скорость *v(n)*, м/с *n* – частота вращения шпинделя		
Глубина, *t*, мм (ширина среза *b*, мм)		
Подача S_z, мм/зуб (толщина среза *a*, мм)		
Передний угол γ, град		
Задний угол α, град		
Износ по задней поверхности δ, мм		

Продолжение табл. 1

1	2	3
Угол наклона режущей кромки λ (ω), град		
Разнонаклонность соседних зубьев, Δω		

Примечание: 1. Регенеративные автоколебания наблюдаются в диапазоне скоростей $v_1 – v_3$. 2. Влияние условий резания на силу P и амплитуду автоколебаний A приведены для скорости v_2.

Работа Васина С.А. [11] (2006 г.) посвящена исследованию именно этих видов колебаний. Схема исследований приведена на рис. 9, где колебания силы резания измеряются динамометром (разделяя ее значение на статическую $P_z^{стат}$ и динамическую $P_z^{дин}$ составляющие), рис. 10, 11, а амплитудно–частотная характеристика (рис. 12) строится по результатам измерения колебаний образца, зажатого в тисках, акселерометром. Автоколебания, возникающие во время резания каждым зубом из–за появления волнистости на свободной поверхности и поверхности резания в этих условиях измерения, не могут быть определены и, естественно, не рассматривались.

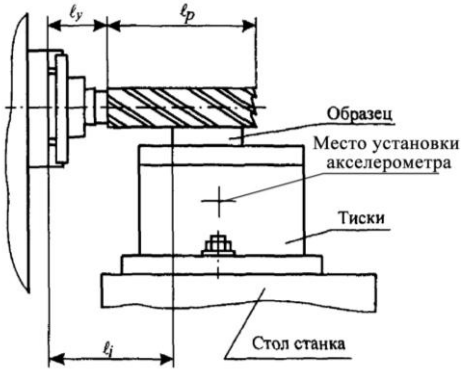


Рисунок 9 – Схема установки концевой фрезы относительно заготовки [11] (2006 г.)

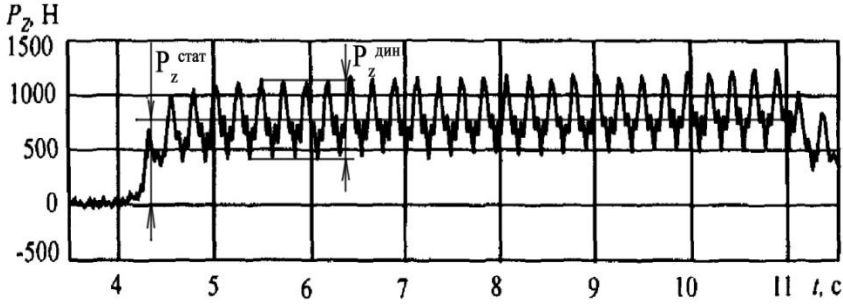


Рисунок 10 – Типичная осциллограмма силы резания
в процессе фрезерования плоскости концевой фрезой

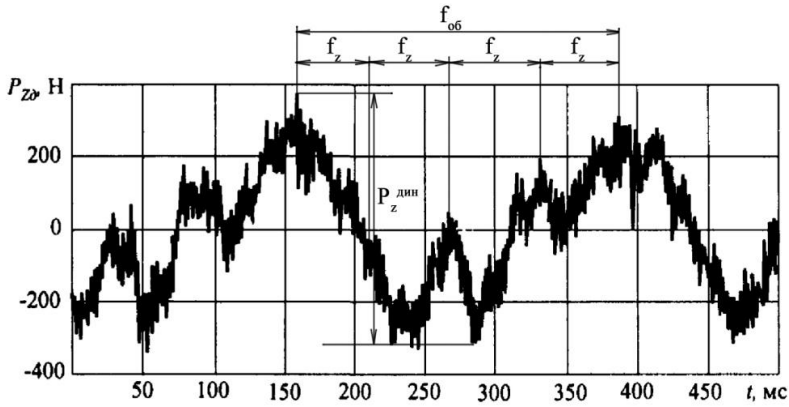


Рисунок 11 – Фрагмент типичной осциллограммы
изменения динамической составляющей силы резания [11]

Панчуком В.Г [12] (2009 г.) рассмотрен алгоритм расчета составляющих силы резания во время работы отрезными фрезами при изменения площади срезаемого слоя, связанной с геометрией инструмента, размерами и формой отрезаемого прутка и режимами фрезерования. Определение мгновенных значений силы резания на протяжении периода полного цикла отрезания обеспечивает получение временных реализаций составляющих силы резания, которые учитывают нестационарный характер нагружения отрезной фрезы при ее работе.

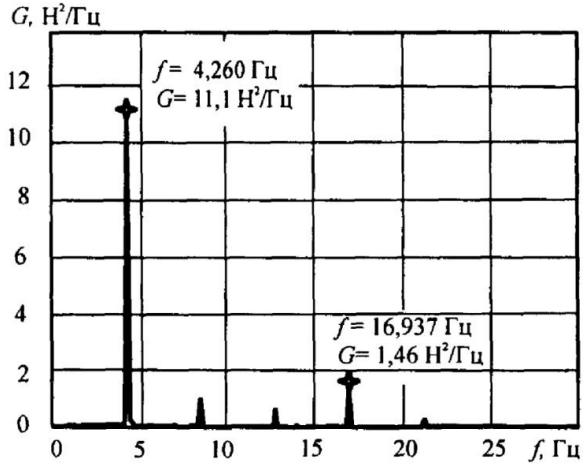


Рисунок 12 – Амплитудно–частотная характеристика колебательного процесса фрезерования [11]

Эти данные, по утверждению автора, позволяют оценить динамическую устойчивость отрезной фрезы. В качестве сравнительной характеристики динамического состояния дисковой фрезы используют амплитуду вынужденных колебаний B_{ij}, которую определяют по формуле:

$$B_{ij} = \frac{C_j p_j^2}{\omega_i^2 - p_j^2}, \tag{6}$$

где p_j – круговая частота контакта зубьев;

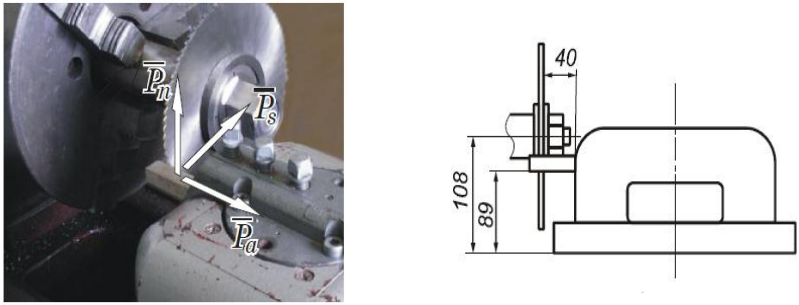
C_j – амплитуда вынуждающей силы резания;

ω_i – собственная круговая частота дисковой фрезы.

В качестве критерия оценки динамической устойчивости фрезы при данных условиях фрезерования принимают максимальное значение по абсолютной величине амплитуды вынужденных колебаний:

$$C_{r\max} = (|B_{ij}|), \tag{7}$$

На рис. 13 показана схема измерения составляющих силы резания с помощью динамометра УДМ–600, а также расчетное и измеренное значение силы отжима, рис. 14.



а б

Рисунок 13 – Схемы ориентации составляющих силы резания (а) и закрепления заготовки (б) при ее отрезке [12] (2009 г.)

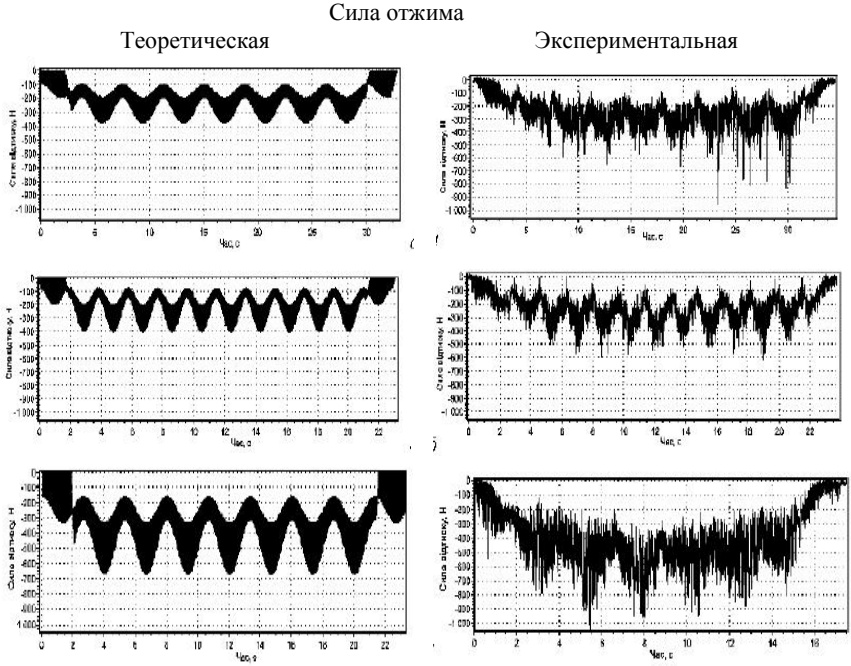


Рисунок 14 – Теоретическая и экспериментальная временная реализация силы отжима при различных значениях $C_{r\,max}$:

а) $C_{r\max} = 0,5H$, $\varepsilon_{n_p} = 5,9\%$; б) $C_{r\max} = 4,6H$, $\varepsilon_{n_p} = 10,8\%$;

в) $C_{r\max} = 173,3H$, $\varepsilon_{n_p} = 12,4\%$ [12] (2009 г.)

Таким образом, в данных исследованиях рассматривают только колебания сил резания, а собственную частоту диска фрезы рассчитывают. Другими словами и в этом случае основной причиной возбуждения колебаний при фрезеровании считают вынужденные колебания, а возбуждение автоколебаний не рассматривают.

В работе S. Kato [13] (1981 г.) изучается колебание силы резания при фрезеровании плоскости однозубой фрезой с винтовым зубом, рис. 15. В данных исследованиях в качестве упругого элемента, по деформации которого измеряют значения составляющих силы резания, используют оправку для крепления фрезы, на торце которой установлено зеркало. При изгибе оправки, отраженный от зеркала луч света отклоняется и по величине отклонения в различных плоскостях определяют значения составляющих силы резания. Обрабатываемая деталь намного более жесткая по сравнению с инструментом. В данном способе появляется возможность измерять силу резания непосредственно во время прохождения зубом фрезы под срезаемой стружкой. Несмотря на то, что авторы статьи рассматривают колебание силы, измеряя ее величину от момента врезания зуба под стружку до момента выхода из–под стружки, т.е. вынужденные колебания, однако, на экспериментальной кривой изменения силы появляются волны (при попутном фрезеровании стали), которые характеризуют появление дополнительных автоколебаний, рис. 15.

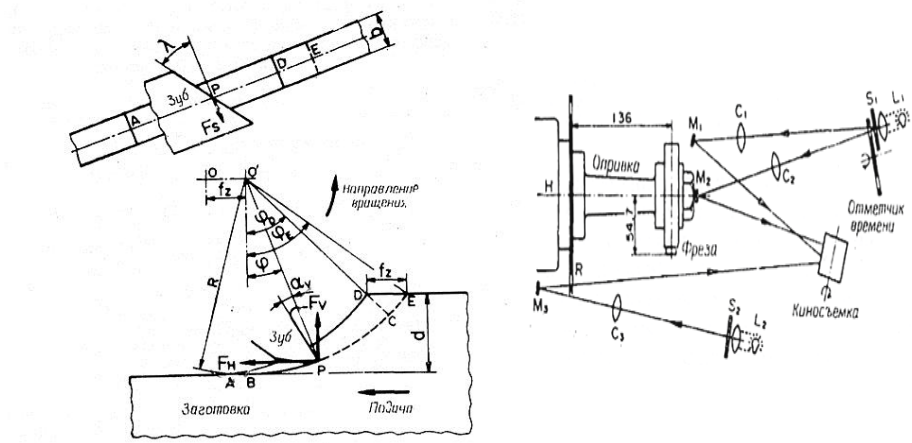
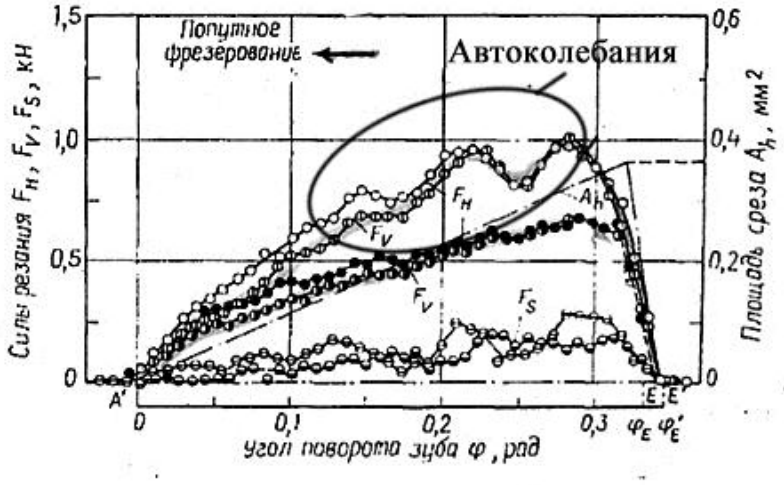


Рисунок 15 – Оптическая система для измерения силы резания [13]:
L – источник света; $C_{1, 2, 3}$ – конденсаторные линзы; $M_{1,2,3}$ – зеркала;
H – передняя бабка токарного станка; R – диск с щелями



б

Рисунок 16 – Колебания горизонтальной, вертикальной и осевой силы резания при попутном фрезеровании ($\alpha = 0°$, $\lambda = 25°$, $b = 3$ мм, $d = 3$ мм, $f_z = 0{,}35$ мм/зуб) [13]: ○○○ – углеродистая сталь, ●●● – чугун с шаровидным графитом

C.Y. Huang [14] (2011 г.) при изучении влияния условий резания на динамические силовые факторы и процессы демпфирования при фрезеровании, применяет специальное устройство для закрепления обрабатываемого образца, рис. 17, которое позволяет детали совершать колебательные движения в направлении ее минимальной жесткости. Автор рассматривает колебательную систему с одной степенью свободы. Инструмент (концевая фреза) значительного диаметра принимается условно жестким. На осциллограммах отклонений детали, рис. 18, при частоте вращения шпинделя n = 420 об/мин хорошо видны волны, возникающие в результате появления автоколебаний. С увеличением частоты вращения до n = 840 об/мин автоколебания вырождаются, зато появляются, существенные по величине, свободные колебания после выхода зуба фрезы из–под стружки.

Аналогичную систему измерения колебаний при концевом фрезеровании применил Ahmad Yusoff в PhD работе [15] (2010 г.), рис. 19.

Особенностью последних рассмотренных работ является отказ от применения стандартных динамометров для изучения вибраций при фрезеровании. Это связано с их высокой жесткостью, которая не позволяет проводить изучение возбуждения автоколебаний, в направлении изменения толщины срезаемого слоя из-за явлений регенерации.

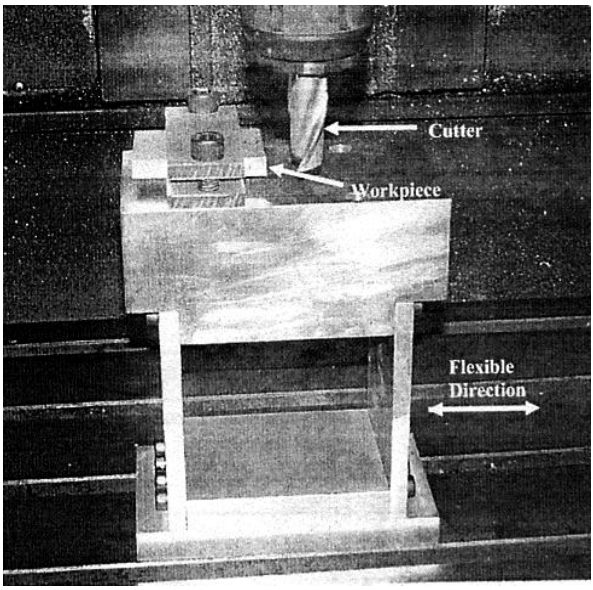


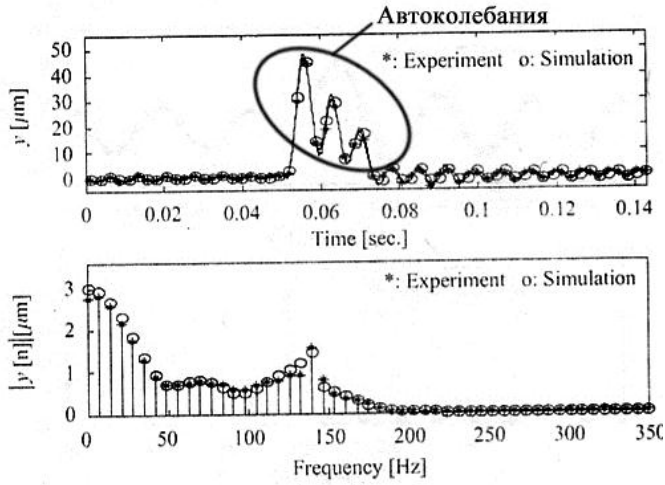
Рисунок 17 – Устройство для исследования колебаний
при концевом фрезеровании [14] (2011 г.)

Основным недостатком рассмотренных выше устройств для измерения вибраций является невозможность изменения их динамических характеристик (жесткость, демпфирования, массы и частоты собственных колебаний).

Эти недостатки были устранены в работе Логоминова В.А. [7] (2013 г.), в которой применили устройство, рис. 20, где в качестве упругого элемента была использована защемленная пластина с обрабатываемым образцом, жестко закрепленная на ее торце. При фрезеровании пластина выполняла роль упругой системы (УС) детали. Соотношение размеров пластины и обрабатываемого образца позволяло избегать появления крутильных колебаний, поэтому УС детали испытывала только изгибные колебания по 1 форме.

Изменение динамических характеристик УС детали легко получали путем присоединения дополнительной массы – 5, введением демпфирующих сред – 13 или изменением вылета пластины – 2. Колебания обрабатываемого образца измеряли индуктивным датчиком перемещений – 10. Разработанное устройство позволяет отдельно изучать влияние геометрии фрезы, условий резания и динамических характеристик детали на условия возбуждения всех видов колебаний: вынужденных колебаний, автоколебаний и свободных колебаний. Для эффективного применения разработанного устройства инструмент должен быть максимально жестким.

n = 420 об/мин



n = 840 об/мин

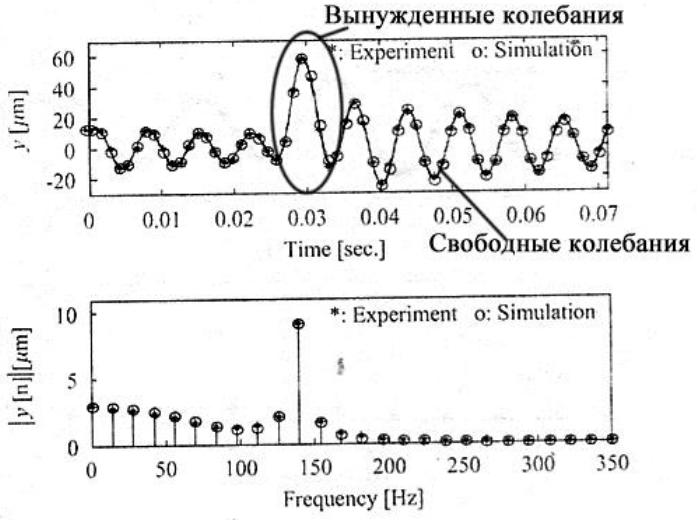


Рисунок 18 – Сравнение экспериментальных и расчетных результатов при исследовании вибраций и АЧХ детали [14] (2011 г.)

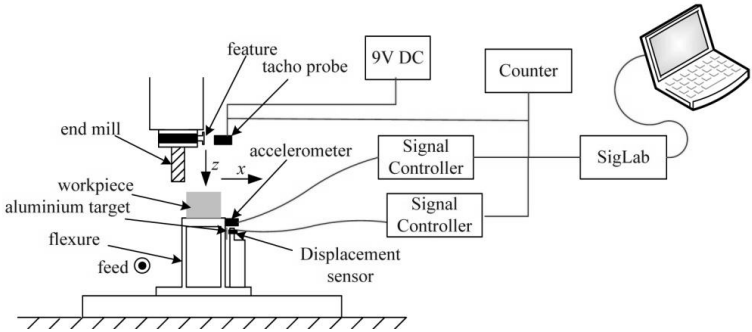


Рисунок 19 – Экспериментальная установка для исследования колебаний при концевом фрезеровании [15] (2010 г.)

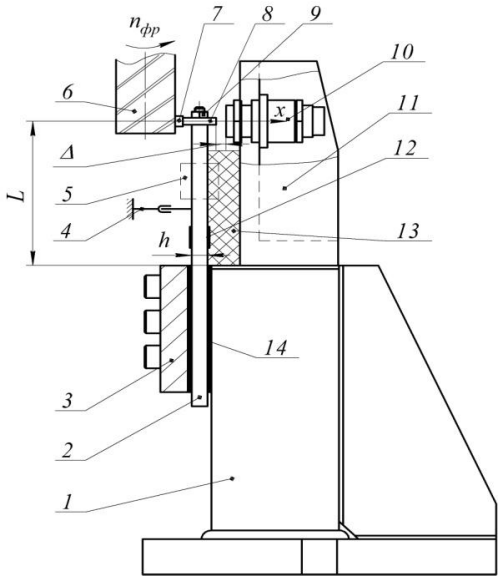


Рисунок 20 – Принципиальная схема устройства для исследования механических колебаний при фрезеровании тонкостенных деталей [7] (2013 г.):
1 – основание; 2 – упругий элемент (защемленная пластина); 3 – прижим; 4 – демпфер; 5 – дополнительная масса; 6 – концевая цилиндрическая фреза; 7 – режущий элемент; 8 – образец; 9 – гайка; 10 – индуктивный датчик; 11 – стойка; 12 – тензодатчик; 13 – вязкоупругая демпфирующая среда (демпфер); 14 – демпфирующие прокладки

Однако, при изучении осциллограмм отклонений детали при высоких частотах вращения шпинделя (рис. 8, $n \geq 560$ об/мин) на данном устройстве не возможно определить точку выхода зуба фрезы из–под стружки, что не позволяет точно измерить время резания $t_{рез}$ и время холостого хода $t_{х.х}$. В связи с этим, возникает необходимость усовершенствования этого устройства путем добавления в его измерительную систему возможности точного определения на осциллограмме отклонения детали точек начала и окончания контакта зуба фрезы с деталью.

Выводы

1. Показано, что при изучении динамики процессов резания, в которой рассматривается условия возбуждения вибраций необходимо учитывать не только силы резания, но и структурные свойства (жесткость, массу, характеристики демпфирования и собственные частоты колебаний) как инструмента, так и обрабатываемой детали. В зарубежной литературе разработаны и получают дальнейшее развитие теория регенеративных автоколебаний и методы построения «лепестковых» диаграмм для определения виброустойчивых условий фрезерования в широком скоростном диапазоне. Исследования в данном направлении особенно актуальны при обработке тонкостенных деталей на станках с ЧПУ, так как в этом случае возникает высокая вероятность возбуждения нежелательных вибраций.

2. Анализ методов исследования вибраций показал, что в последнее время колебания изучают не с помощью динамометров, а с помощью специальных упругих систем, оснащенных датчиками перемещения и акселерометрами. Данные устройства позволяют наблюдать условия появления, развития и вырождения автоколебаний, которые могут быть наложены на вынужденные колебания, а также в условиях неравномерного фрезерования с выходом зубьев из зацепления с припуском измерять и свободные затухающие колебания детали и фрезы.

Список использованных источников: 1. *Tlusty J.* Analysis of the State of Research in Cutting Dynamics / J. Tlusty // Annals of the CIRP. – 1978. – Vol. 2. – P. 583–589. **2.** *Opitz H*. Improvement of the dynamics stability of the milling process by irregular tooth pitch / *H. Opitz, E. U. Dregger, H. Rose* // Advances in Machine Tool Design and Research, Proc. of MTDR Conference, 1966. – № 7. – P. 13–227. **3.** *Schmitz T. L.* Machining Dynamics: Frequency Response to Improved Productivity / *Tony L. Schmitz, Kevin S. Smith*. – Springer Science Business Media, LLC, 2009. – 310 hp. **4.** *Budak E.* Analytical Prediction of Chatter Stability Conditions for Multi–Degree of Systems in Milling. Part I: Modeling / E. Budak, Y. Altintas // Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. – 1998. – Vol. 120. – P. 22–30 **5.** *Opitz H.* Improvement of the dynamics stability of the milling process by irregular tooth pitch / *H. Opitz, E. U. Dregger, H. Rose* // Advances in Machine Tool Design and Research, Proc. of MTDR Conference, 1966. – № 7. – P. 13–227. **6.** *Yusoff A.R.* Literature review of optimization techniques for chatter suppression in machining / *A. R. Yusoff,* M. R. Z. M. Suffian, M. Y. Taib // Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES) ISSN (Print): Volume 1, 2011, P. 47–61.**7.** *Логоминов В. А.* Формирование шероховатости обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных элементов деталей: дис. … канд. техн. наук.: 05.03.01: защищена 21.02.2013: утв. 25.04.2013 / *Логоминов Виктор Алексеевич*. –

Запорожье, 2013. – 226 с. **8.** Основы теории резания материалов: учебник [для высш. учебн. заведений] / *Мазур Н. П., Внуков Ю. Н., Грабченко А. И. и др.* ; под общ. ред. *Н. П. Мазура и А. И. Грабченко.* – 2–е изд., перераб. и дополн. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с. **9**. *Козлов А. А.* Фрезерование цветных металлов и сплавов: Автореферат дис…. канд. техн. наук. – Томск, 1966. 24 с. **10.** *Yusoff A. R.* The role of tool geometry in process damped milling / *A. R. Yusoff, S. Turner, Ch. M. Taylor, N. D. Sims* // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, DOI 10.1007/s00170-010-2586-6 Springer Publication (in press). P. 883-895. **11.** *Васин С. А.* Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании. Серия «Библиотека инструментальщика». – М.: Машиностроение, 2006. – 384 с. **12.** *Панчук В.Г.* Теоретичні, основи проектування відрізних фрез : автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.03.01 / В. Г. Панчук; Нац. техн. ун–т України "Київ. політехн. ін–т". – К., 2009. – 36 с. **13.** *Като С.* Связь между колебаниями силы резания и условиями резания при фрезеровании плоскости. Часть 1. Фрезерование плоскости однозубой фрезой с винтовым зубом / *С. Като, Т. Ямада, М. Хосимото, К. Ямагути* // Конструирование, 1982, т. 103, №2, С. 211–228 **14.** *Hung C. Y.* Effects of cutting conditions on dynamic cutting factor and process damping in milling / *C. Y. Hung. J.– J. Junz Wang* // Internation jornal of Machine Toola and Manufacture 51, 2011, P. 320–330. **15.** *Yusoff A. R.* Optimization of variable helix end milling tools / Qualification: PhD Date awarded: 22.09.10 Submitted for the degree of Doctor of Philosophy, August 2010.

Bibliography (transliterated): 1. *Tlusty J.* Analysis of the State of Research in Cutting Dynamics / J. Tlusty // Annals of the CIRP. – 1978. – Vol. 2. – P. 583–589. **2.** *Opitz H.* Improvement of the dynamics stability of the milling process by irregular tooth pitch / *H. Opitz, E. U. Dregger, H. Rose* // Advances in Machine Tool Design and Research, Proc. of MTDR Conference, 1966. – No 7. – P. 13–227. **3.** *Schmitz T. L.* Machining Dynamics: Frequency Response to Improved Productivity / *Tony L. Schmitz, Kevin S. Smith.* – Springer Science Business Media, LLC, 2009. – 310 p. **4**. *Budak E.* Analytical Prediction of Chatter Stability Conditions for Multi–Degree of Systems in Milling. Part I: Modeling / *E. Budak, Y. Altintas* // Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. – 1998. – Vol. 120. – P. 22–30. **5.** *Opitz H.* Improvement of the dynamics stability of the milling process by irregular tooth pitch / *H. Opitz, E. U. Dregger, H. Rose* // Advances in Machine Tool Design and Research, Proc. of MTDR Conference, 1966. – No 7. – P. 13–227. **6.** *Yusoff A.R.* Literature review of optimization techniques for chatter suppression in machining / *A. R. Yusoff, M. R. Z. M. Suffian, M. Y. Taib* // Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES) ISSN (Print): Volume 1, 2011, P. 47–61. **7.** *Logominov V.A.* Formirovanie sherohovatosti obrabotannoy poverhnosti pri kontsevom tsilindricheskom frezerovanii tonkostennyih elementov detaley: dis. … kand. tehn. nauk.: 05.03.01: zaschischena 21.02.2013: utv. 25.04.2013 / *Logominov Viktor Alekseevich*. – Zaporozhe, 2013. – 226 p. **8.** Osnovyi teorii rezaniya materialov: uchebnik [dlya vyissh. uchebn. zavedeniy] / *Mazur N. P., Vnukov Yu. N., Grabchenko A. I. i dr.* ; pod obsch. red. *N. P. Mazura i A. I. Grabchenko*. – 2-e izd., pererab. i dopoln. – Harkov : NTU «HPI», 2013. – 534 p. **9.** *Kozlov A. A.* Frezerovanie tsvetnyih metallov i splavov: Avtoreferat dis…. kand. tehn. nauk. – Tomsk, 1966. 24 p. **10.** *Yusoff A. R.* The role of tool geometry in process damped milling / *A. R. Yusoff, S. Turner, Ch. M. Taylor, N. D. Sims* // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, DOI 10.1007/s00170–010–2586–6 Springer Publication (in press). P. 883 –895. **11.** *Vasin S. A.* Prognozirovanie vibroustoychivosti instrumenta pri tochenii i frezerovanii. Seriya «Biblioteka instrumentalschika». – M.: Mashinostroenie, 2006. – 384 p. **12.** *Panchuk V. G.* TeoretichnI, osnovi proektuvannya vIdrIznih frez : avtoref. dis... d–ra tehn. nauk: 05.03.01 / V. G. Panchuk; Nats. tehn. un–t UkraYini "KiYiv. polItehn. In–t". – K., 2009. – 36 p. **13.** *Kato S.* Svyaz' mezhdu kolebanyyamy syly rezanyya y uslovyyamy rezanyya pry frezerovanyy ploskosty. Chast' 1. Frezerovanye ploskosty odnozuboy frezoy s vyntovыm zubom / *S. Kato, T. Yamada, M. Khosymoto, K. Yamahuty* // Kostruyrovanye, 1982, t. 103, No 2, P. 211–228. **14.** *Hung C. Y.* Effects of cutting conditions on dynamic cutting factor and process damping in milling / *C. Y. Hung. J.–J. Junz Wang* // Internation jornal of Machine Toola and Manufacture 51, 2011, P. 320–330. **15.** *Yusoff A. R.* Optimization of variable helix end milling tools / Qualification: PhD Date awarded: 22.09.10 Submitted for the degree of Doctor of Philosophy, August 2010.

УДК 621.787

І.В.ГУРЕЙ, д-р техн. наук, Львів, Україна, Жешув, Польща
В.І.ГУРЕЙ, канд. техн. наук, Львів, Україна

ТЕОРЕТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМОНАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПІД ЧАС ФРИКЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ

Отримано математичні рівняння для визначення температури і напружень у зоні контакту інструмент-деталь під час фрикційного зміцнення плоских поверхонь. Показано, що температура та напруження у зоні контакту мають імпульсних характер. Зі збільшенням характерного розміру зони контакту, відношення довжини лінії контакту до її ширини, максимум температури та напружень зростає.
Ключові слова: термонапружений стан, зона контакту, у зоні контакту, фрикційне зміцнення

Получено математические уравнения для определения температуры и напряжений в зоне контакта инструмент-деталь при фрикционном упрочнении плоских поверхностей. Показано, что температура и напряжения имеют импульсный характер. С увеличением характерного размера зоны контакта, отношения длины линии контакта к ее ширине, максимум температуры и напряжений возрастает.
Ключевые слова: термонапряженное состояние, зона контакта, инструмент, деталь, фрикционное упрочнение

Mathematical equations of defined temperatures and stresses in the zone of contact tool-part during friction hardening plane surfaces are works out.It is shown, that the temperatures and stresses have pulse in character. Maximum of temperatures and stresses are increasingunder increase of representative value of contact zone, ratio of contact line length to it width.
Keywords: heat-stress state, contact zone, tool, part, friction hardening

Процес фрикційного зміцнення є швидкоплинним процесом [1] і існуючі експериментальні методи не дозволяють з достатньою точністю визначити температурні та деформаційні поля у зоні контакту інструмент-деталь. У зоні контакту проходять складні фізико-механічні процеси, тому теплову задачу за рахунок прийнятих допущень досить сильно спрощують і теоретичні викладки не завжди відповідають реальній картині[2-4].

Для керування якості зміцнених шарів необхідно оцінити температурні поля та термонапружений стан, який виникає під час фрикційного зміцнення. Моделювання задач приводить до ідеалізації реальної ситуації, але в певній мірі дозволяє оцінити зміну температури та напруженого стану при дії рухомих концентрованих джерел енергії[5].

При аналізі теплових процесів у зоні контакту при фрикційному зміцненні на основі теплового контакту приймаємо, що температури в зоні контакту на поверхні контакту є рівними, а потужність тертя у кожній точці площадки контакту рівна сумі інтенсивностей потоків теплоти, яке поглинає кожне тіло пари тертя.

При фрикційному зміцненні площа зони контакту інструмент-деталь

© І.В.Гурей, В.І.Гурей, 2016

залежить від форми та розмірів робочої поверхні інструмента та деталі, режимів зміцнення, а особливо, від нормальної сили зміцнення. Площа контакту є еліпсом, у якого більша діагональ рівна довжині лінії контакту інструмент-деталь. При першому наближенні площу контакту можна розглядати у вигляді тонкої стрічки. У процесі фрикційного зміцнення нагрівання зони контакту зумовлюється інтенсивним тертям та зсувним деформуванням і максимальні значення контактних дотичних напружень розташовані на певній глибині, то у даному випадку розглядається підповерхневе розташування джерел нагрівання [6].

Так як характерний розмір зони контакту є набагато меншим за розміри інструмента та деталі, то останні можна розглядати як однорідні ізотропні напівпростори, вздовж границі яких рухається зона тертя з різними швидкостями. При розв'язку теплової задачі також були зроблені наступні допущення: у зоні контакту інструмента та деталі є тільки пружні деформації;розмір і форма зони контакту в процесі зміцнення залишаються незмінними; не враховується вплив динамічних ефектів на процеси тертя у зоні контакту; теплофізичні характеристики матеріалів контактуючих тіл залишаються постійними незалежно від зміни температури та тисків; не враховується вплив плівки мастила на перерозподіл тиску по поверхні контакту.

Виберемо систему координат таким чином, щоб осі *y* та *z* лежали на поверхні тіла, а вісь *x* направлена в її глибину. Нехай у цьому напівпросторі$x \geq 0$ на відстані *l* від її грані паралельно до неї рухається з постійною швидкістю *v* у напрямку осі *y* плоске джерело теплової енергії у вигляді безконечної стрічки шириною *d*. При переміщенні джерела її поздовжня вісь площини симетрії перпендикулярна до осі *y* (рис. 1).

Розглянемо теплофізичну задачу при постійному контакті інструмента з оброблюваною деталлю. Температурне поле у загальному вигляді у поверхневому шарі зміцнюваної деталі та інструменту в зоні контакту буде описуватись наступним рівнянням теплопровідності [4]:

$$Pe_i \frac{\partial t_i}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 t_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_i}{\partial y^2} + \left(\frac{2d}{\delta}\right)^2 \frac{\partial^2 t_i}{\partial z_i^2} \qquad (i = 1, 2)$$

при краєвих умовах у зоні контакту:

$t_1 = T_1, \quad t_2 = T_2$ при $\tau = 0$;

$t_1(x, y, \tau) = t_2(x, y, \tau)$ при $z_i = 0$;

$$k \frac{\partial t_1}{\partial z_1}(x, y, z_1, \tau)\Big|_{z_1 \to +0} + (1-k) \frac{\partial t_2}{\partial z_2}(x, y, z_2, \tau)\Big|_{z_2 \to +0} = -v(x, y, \tau)\sigma_\tau(x, y, \tau),$$

поза зоною контакту

$$\frac{\partial t_i}{\partial z_i}\left(x, y, z_i, \tau\right)\Big|_{z_i \to +0} = Bi\left(t_i - t_з\right), Pe_i = \frac{4d^2}{a_i \tau^0}; \tau^0 = \frac{2d}{v_\partial}; \; k = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}; \; Bi = \frac{2d\alpha_i}{\lambda_i},$$

де t_1 – температура деталі; t_2 – температура інструменту; $t_з$ – температура мастильно-охолоджувальної рідини; $2d$ – ширина зони контакту; δ – глибина розповсюдження теплоти; σ_τ – дотичні напруження у зоні контакту; v – швидкість відносного ковзання інструмента і деталі; v_∂ – лінійна швидкість обертання інструмента; a, λ – коефіцієнти температуропроводності і теплопровідності відповідно; α – коефіцієнт теплообміну деталі і інструменту з мастильно-охолоджувальною рідиною; *Pe* – критерій Пекле; *Bi* – критерій Біо; τ–час.

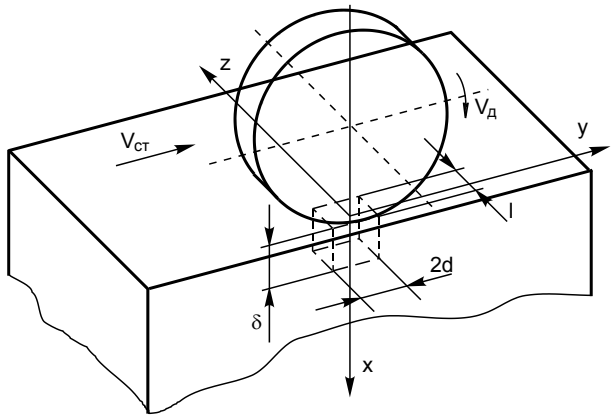


Рисунок 1 – Розрахункова схема фрикційного зміцнення плоских поверхонь

У залежності від параметрів фрикційного зміцнення величина критерію Пекле може змінюватися у досить широких межах. Критерій Пекле визначає відношення кількості теплоти, яка переноситься конвекцією вздовж напряму відносного ковзання, до теплоти, яке проникає у зміцнювану деталь за рахунок теплової дифузії. Більшість джерел і стоків теплоти, які діють у технологічних системах є швидкорухомими. Для швидкорухомих джерел теплової енергії критерій Пекле$Pe \geq 10$ [4]. При значеннях критерію Пекле$Pe \geq 10$ кількість теплоти, яке переноситься конвекцією вздовж напряму відносного ковзання набагато більша теплоти, що переноситься у зміцнювану деталь за рахунок теплової дифузії. Тому теплота не розповсюджується попереду джерела енергії, а тільки під джерелом і позаду його.

У випадку фрикційного зміцнення критерій Пекле$Pe\geq$ 10 і джерело висококонцентрованої енергії має більшу швидкість, аніж швидкість проникнення тепла за рахунок теплової дифузії. Виходячи з цього для визначення температурного поля T у нашому випадку рівняння теплопровідності запишемо у наступному вигляді:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{v}{a}\frac{\partial T}{\partial y_1}-\frac{1}{a}\frac{\partial T}{\partial \tau}=-\frac{q(\tau)}{\lambda}\delta(x_1-l)\left[S_-(y_1+d)-S_+(y_1-d)\right] \quad (1)$$

та краєві умови

$$\left\{\frac{\partial T}{\partial x_1}\right\}_{x_1=0}=0,\quad \left\{\frac{\partial T}{\partial x_1},\frac{\partial T}{\partial y_1},T\right\}_{\substack{x_1\to\infty\\ |y_1|\to\infty}}=0,\quad T\big|_{\tau=0}=0\ ,\ y_1=y-v\tau;\quad x_1=x\ ; \quad (2)$$

де a, λ – коефіцієнти температуропровідності та теплопровідності відповідно; $q(\tau)$ – питома поверхнева густина теплового потоку джерела енергії; $\delta(\xi)$ – функція Дірака; $S_{\pm}(\xi)$ – асиметричні одиничні функції.

Розв'язуючи теплову задачу (1) та (2) з допомогою інтегральних перетворень Фур'є по y_1 та Лапласа по τ, отримаємо наступне температурне поле:

$$T=\frac{1}{4\pi\lambda}\int_0^{\tau}\frac{q(\tau-\tau_0)}{\tau_0}\int_{y_1-d}^{y_1+d}\left[\exp\left(-\frac{r_+^2}{4a\tau_0}\right)+\exp\left(-\frac{r_-^2}{4a\tau_0}\right)\right]d\tau_0 dy_0\,, \quad (3)$$

де $r_{\pm}^2=\left(x_1\pm l\right)+\left(y_0+v\tau_0\right)^2$.

Задачу термопружності можна розв'язати для випадку, коли

$$\left\{\sigma_{zx},\sigma_{xy}\right\}_{x_1=0}=0,\quad \left\{\sigma_{xx},\sigma_{yy},\sigma_{xy}\right\}_{\substack{x_1\to\infty\\ |y_1|\to\infty}}=0\,.$$

На основі відомих формул та залежностей теорії термопружності, а також використовуючи інтегральні перетворення Фур'є і Лапласа, отримуємо наступні залежності для температурних напружень:

$$\sigma_{xx}=-\frac{k}{2(2\pi)^{3/2}i}\int_{-\infty}^{+\infty}\eta^2 d\eta\int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty}\Big[2|\eta|x_1\phi_-(l)\exp(-x_1|\eta|)-\phi_+(x_1+l)-\phi_-\left(|x_1-l|\right)+$$

$$+\frac{2}{\gamma}\exp\left(-x_1|\eta|-\gamma l\right)\Big]\frac{\beta(\eta)Q(s)}{\Psi}\exp\left(s\tau-i\eta y_1\right)ds\,; \quad (4)$$

$$\sigma_{yy} = -\sigma_{xx} - \frac{E\alpha_t}{1-\upsilon}T - \frac{2k}{(2\pi)^{3/2} i}\int_{-\infty}^{+\infty}\eta^2 d\eta \int_{\sigma+i\infty}^{\sigma+i\infty}\phi_-(l)\frac{\beta(\eta)Q(s)}{\Psi}\times$$
$$\times\exp(s\tau - x_1|\eta| - i\eta y_1)ds; \qquad (5)$$

$$\sigma_{xy} = -\frac{k}{2(2\pi)^{3/2}}\int_{-\infty}^{+\infty}\eta d\eta \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty}\left[2\eta^2 x_1\varphi_-(l)\exp(-x_1|\eta|) - \mathrm{X}(|x_1-l|)sign(x_1-l) - \right.$$
$$\left. -\mathrm{X}(x_1+l)\right]\frac{\beta(\eta)Q(s)}{\Psi}\exp(s\tau - i\eta y_1)ds, \qquad (6)$$

Тут $Q(s) = \int_0^{\infty} q(\tau)\exp(-s\tau)d\tau$; $\Psi = 2i\eta\omega + \frac{s}{a}$; $\gamma^2 = \eta^2 + 2i\eta\omega + \frac{s}{a}$;

$\beta(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{\infty}^{+\infty}\left[s_-(y+d) - s_+(y_1-d)\right]\exp(i\eta y_1)dy_1$; $E = 2G(1+\nu)$;

$k = \frac{E\alpha_t}{\lambda(1-\nu)}$; $\phi_{\pm}(\xi) = \frac{1}{\gamma}\exp(-\xi\gamma) \pm \frac{1}{|\eta|}\exp(-\xi|\eta|)$; $\mathrm{X}(\xi) = \exp(-\xi\gamma) - \exp(-\xi|\eta|)$.

Застосувавши до рівнянь (4), (5) та (6) теорему про згортку, а також положення, що при $x_1 = 0$ температурні напруження σ_{xx} та σ_{xy} будуть рівні нулеві. Також припускаємо, що питома поверхнева густина теплового джерела при фрикційному зміцненні залишається незмінною, тобто

$$q(\tau) = q = const.$$

У той же час питому поверхневу густину теплового джерела енергії можна визначити з рівняння [231]:

$$q = \frac{2\nu P_y \cos(\pi\gamma)\mu}{\pi^{3/2}(1+4\gamma^2)\, l_s d}\left(\frac{1}{2}+y\right)^{\frac{1}{2}-\gamma}\left(\frac{1}{2}-y\right)^{\frac{1}{2}+\gamma}, \qquad (7)$$

$$\gamma = \frac{1}{\pi}arctg\frac{\mu(1-\chi^0)}{1+\chi^0};$$

де χ^0 – постійна Мусхелішвілі для плоских деформацій, χ^0 = 3-4υ;υ – коефіцієнт Пуассона; ν – відносна швидкість ковзання в зоні контакту інструмент-деталь;μ – коефіцієнт тертя в зоні контакту;P_y – нормальна складова сили зміцнення (сила притискання інструмента і деталі); l_s – довжина лінії контакту;d – півширина зони контакту.

Тоді, після відповідних перетворень рівнянь (3) та (5) отримаємо рівняння для визначення температур та напружень у зоні контакту.

Температура та напруження по глибині зміцненого шару будуть визначатися з залежностей:

$$T = \int_0^{Fo} \frac{d\eta}{Fo-\eta} \int_{Y-1}^{Y+1} \exp\left[-\frac{L^2+(\zeta-2Pe\eta)^2}{4(Fo-\eta)}\right] d\zeta\,; \qquad (8)$$

$$\sigma_y = \int_0^{Fo} \left[(Y+1-2Pe\eta)\frac{B_+}{R_+^2} - (Y-1-2Pe\eta)\frac{B_-}{R_-^2} \right] d\eta - \frac{1}{4}\Theta\,. \qquad (9)$$

Тут $\Theta = \dfrac{2\pi\lambda}{qd}T$; $\sigma_y = \dfrac{\sigma_{yy}\pi\lambda(1-\upsilon)}{2E\alpha_t qd}$; $B_\pm = 1-\exp\dfrac{-R^2}{4(Fo-\eta)}$;

$$R_\pm^2 = L^2 + (Y\pm1-2Pe\eta)^2\,;\quad Y = \frac{y}{d}\,;\, L = \frac{l_s}{d}\,;\, Fo = \frac{a\tau}{d^2}\,;$$

Fo – критерій Фур'є, який визначає безрозмірний час.

Використовуючи отримані залежності (8) та (9) були проведені числові розрахунки залежності температури *T* та напруження σ_y від безрозмірного часу *Fo* та різних значеннях *L* і побудовано графічні залежності (рис. 2, 3).

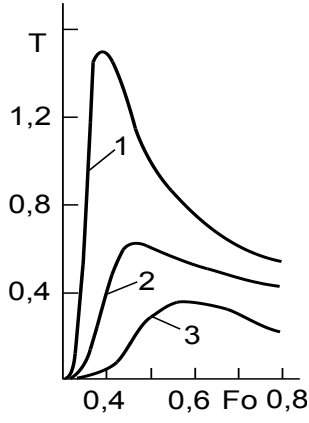


Рисунок 2 – Кінетика температури Θ при фрикційному зміцненні плоских поверхонь:
1 – *L* = 0,01; 2 –*L* = 0,5;
3 –*L* = 1

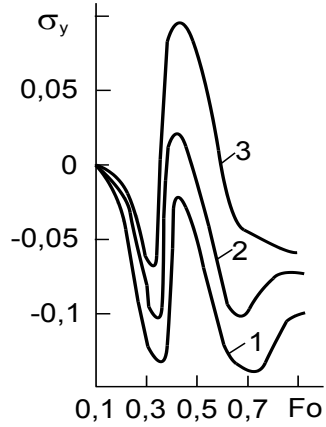


Рисунок 3 – Кінетика напруження σ_y при фрикційному зміцненні плоских поверхонь:
1 – *L* = 0,01; 2 –*L* = 0,5;
3 –*L* = 1

Як показали отримані графічні залежності, температура та напруження у зоні контакту мають імпульсних характер. Особливо сильний імпульсний характер мають напруження. Зі збільшенням характерного розміру зони контакту, параметру L – відношення довжини лінії контакту до її ширини, максимум температури та напружень зростає.

Список використаних джерел: 1. *Hurey I., GureyV., Dmyterko P., Babiarz R.* The research in to components of friction force tool part during friction hardening of plate steel faces // Advances in manufacturing science and technology. – 2014. – N 3. – P. 56-64. **2.** *Бабей Ю.И., Глек Р.И., Максимишин М.Д., Журавлева Н.А.* Термонапряженноесостояние, возникающее в поверхностныхслоях плоских деталей в процессефрикционногоупрочнения // Физико-химическаямеханикаматериалов. – 1982. – № 3. – С. 75-78. **3.** *Подстригач Я.С., Коляно Ю.М.* Неустановившиесятемпературные поля и напряжения в тонких пластинах. – К.: Наукова думка, 1972. – 308 с. **4.** *Глек Р.И.* Температурное поле и напряжение в пластинке, нагреваемой движущимся несквозным ризматическим источником тепла // Термомеханическиепроцессы в кусочно-однородныхэлементахконструкций. – К.: Наукова думка, 1978. – С. 178-182. **5.** *Коровчинский М.В.* Основытеориитермическогоконтакта при локальномтрении // Новое в теориитрения. – М.: Наука, 1966. – С. 98-145. **6.** Основы тепловых явлений при шлифовании деталей машин / *А.В.Якимов, Б.О.Ткаченко, С.Г.Зимин и др*. – Одесса: ОГПУ, 1997. – 272 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Hurey I., GureyV., Dmyterko P., Babiarz R.* The research in to components of friction force tool part during friction hardening of plate steel faces // Advances in manufacturing science and technology. – 2014. – N 3. – P. 56-64. **2.** *Babej Ju.I., Glek R.I., Maksimishin M.D., Zhuravleva N.A.* Termonaprjazhennoesostojanie, voznikajushhee v poverhnostnyhslojah ploskih detalej v processefrikcionnogouprochnenija // Fiziko-himicheskajamehanikamaterialov. – 1982. - № 3. – S. 75-78. **3.** *Podstrigach Ja.S., Koljano Ju.M.* Neustanovivshiesjatemperaturnye polja i naprjazhenija v tonkih plastinah. – K.: Naukova dumka, 1972. – 308 s. **4.** *Glek R.I.* Temperaturnoe pole i naprjazhenie v plastinke, nagrevaemojdvizhushhimsjaneskvoznymprizmaticheskimistochnikom tepla // Termomehanicheskieprocessy v kusochno-odnorodnyhjelementahkonstrukcij. – K.: Naukova dumka, 1978. – S. 178-182. **5.** *Korovchinskij M.V.* Osnovyteoriitermicheskogokontakta pri lokal'nomtrenii // Novoe v teoriitrenija. – M.: Nauka, 1966. – S. 98-145. **6.** Osnovy teplovyh javlenij pri shlifovanii detalej mashin */ A.V.Jakimov, B.O.Tkachenko, S.G.Zimin i dr.* – Odessa: OGPU, 1997. – 272 s.

УДК 621.9.06-752

M.V. KUCHUGUROV, A.E.ZUBAREV,
N.N. CHERNOVOL, Zaporizhzhya, Ukraine

RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF SELF-EXCITED VIBRATIONS AMPLITUDE REDUCING WHEN TURNING BY THE VARIATION OF THE CUTTING SPEED

В статті приведені результати експериментальних досліджень можливості пригнічення автоколивань при точінні через модулюваннння швидкістю різання. Описаний експериментальний підхід щодо здійснення варіативного керування приводом головного руху токарного верстата. Досліджені можливості приводу головного руху роботи в режимі постійного варіювання швидкістю обертання
Ключові слова: точіння, пригнічення автоколивань, модулюваннння швидкістю різання

В статье приведены результаты исследования возможности подавления автоколебаний при точении модулированием скоростью резания. Описан экспериментальный подход осуществления вариативного управления приводом главного движения токарного станка. Исследованы возможности привода главного движения работы в режиме постоянного варьирования скоростью вращения.
Ключевые слова: точение, подавления автоколебаний, модулирование скоростью резания

In this paper the results of research of the possibilities of self-excited vibrations suppression in turning by the cutting speed modulation are presented. The experimental approach to conduct the variative control of lathe main drive is described. The possibilities of main drive working in continuous rotation speed mode are researched.
Keywords: turning, suppression of self-excited vibrations, cutting speed modulation

The problem of appearance of self-excited vibrations in turning remains relevant to this day. The excess of the allowable values of the vibration amplitude of tool or blank leads to degradation of the machined surface quality, quick tool wear and breakage, and also to damaging the elements of machine.

For now different approaches of the vibration suppression at machining are applied:

- using the active damper devices;
- tightening the elements of machine – device – tool – detail (MDTD) system;
- choosing the optimal cutting conditions;
- the modeling for prediction and nursing from self-excited vibrations (to the prejudice of performance).

Self-excited vibrations are the ones that appeared and supported by internal features of the working system at the presence of constant external energy source. They appear in turning as a consequence of the elastic deformation of the elements of MDTD system at the influence of the external exciting cutting force.

© Н.Н. Черновол, М.В. Кучугуров, А.Е. Зубарев, 2016

Self-excited vibration is the main obstacle towards increasing the machining performance, because they are very hard-suppressed and highly stable.

One of the modern methods of chatter suppression at machining is cutting with constantly-varying the main motion speed [1, 2, 3, 4]. This approach is based on reducing of the influence of the regenerative exciting by destruction of stable phase shift $\psi = 180°$ on the cutting surface between the trail, that is left from the previous tool path (revolution of workpiece), and current vibration trajectory.

The purpose of this article is determination of the efficiency of described method of chatter suppression when turning. The 16K20T1 lathe with 2P22 numeric control (NC) system was used for this. The external device – *modulator* – was used for enable to vary the main motion speed that is built-in main drive control system (Fig. 1), which is controlled by the NC through the converter C1 that governs the motor M1. The last one transfers the rotation to spindle with chuck through the belting and gearbox.

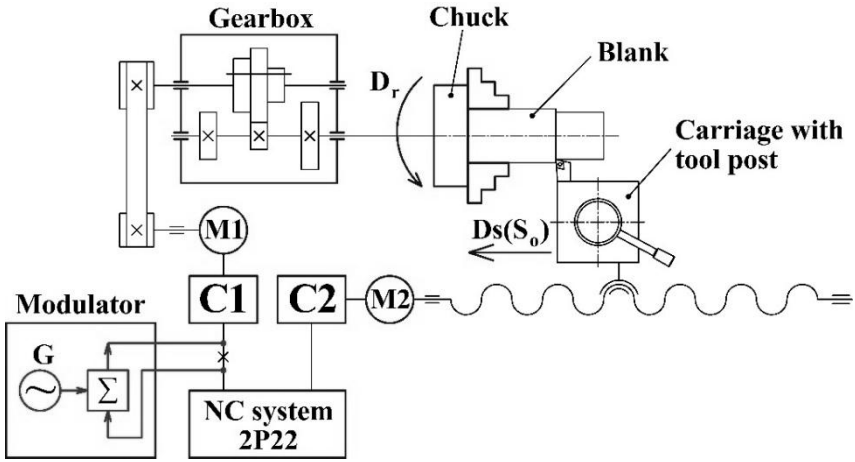


Figure 1 – The machine movements control scheme:
M1, M2 – the motors of main drive and feed drive; C1, C2 – drives converters; ∑ – adder;
G – generator; Dr – main motion (the rotation of spindle);
Ds – feed motion (the longitudinal displacement of carriage)

Modulator is a digital device that is based on single-chip computer, and represents the sinusoidal signal generator G and adder ∑, which adds the control signal from the NC system and generator signal. As a result, the modulated signal transfers to the converter C1, which controls the spindle speed n_{sp}.

By changing the waveform of generator signal G, the various law of spindle speed n_{sp} changing can be set. In this research the harmonic waveform was used

with the feature of varying it frequency and amplitude during the machining. In this paper the term *modulation* is used for describing this drive mode.

As a cutting tool the device of researching the self-excited vibrations at turning [5] was used. The construction of it allows to record tool displacements in horizontal and vertical directions. The cutter has reduced stiffness that allows conducting the researching in the best conditions in terms of chatter studying.

The cylindrical blank (L = 130 mm; D = 100 mm, material – AISI-1045 steel, hardness HB170) is used for the experiments. The encoder sensor (HTR-5B-100-3-5V) was used for measuring of the actual spindle speed. The half-coupling was installed on his axis, which got the rotation from the end of blank through the rubber gasket.

Thus, the test bench (Fig. 2) was created for researching the influence of the *modulation* of the cutting speed, which allows performing the longitudinal turning and record next cutting process parameters:

- elastic displacements of tool in horizontal and vertical directions;
- actual spindle speed n_{sp}.

The received signal was processed for measurement of these parameters by one of this software: MatLAB, Octave. The method of processing is described by authors in references [6, 7].

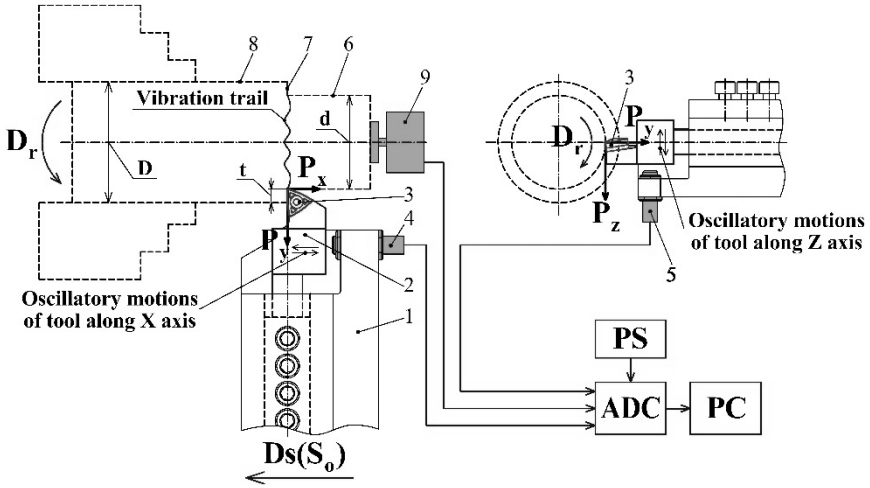


Figure 2 – The test bench scheme of the measurement of the tool vibrations when turning:
1 – body of device; 2 – elastic element; 3 – insert; 4 – horizontal tool displacement sensor;
5 – vertical tool displacement sensor; 6 – machined surface; 7 – cutting surface;
8 – machining surface; 9 – encoder; Dr – main motion; Ds(So) – feed motion;
ADC – analog-digital converter; PC – personal computer; PS – Power supply

The spindle speed *modulation* is characterized by next parameters:

- frequency of *modulation* Fn – determines the amount of periodic change of the n_{sp} value per second;

- depth of *modulation* An – maximal deviation of the actual spindle speed n_{sp} from the average value.

Seeing, that the elements of machine have the inertial properties, the actual spindle speed n_{sp} can be differing from it set by the NC system and the *modulator* depending on the Fn and An parameters. The tests with setting of different values of the depth and frequency of the *modulation* were conducted to determine the capabilities of the main drive. The measuring of actual rotation speed was carried out by encoder.

Tests were conducted:

- without cutting – in the absence of external load;

- when cutting by the rigid cutter (PDJNR 2525 M11, insert: DNMG 441PF r = 1,2 mm, material T15K6) at t = 2 mm; So = 0,15 mm/rev; n_{sp} = 403 rev/min; D = 94,8 mm.

Following the comparison of the specified *modulation* parameters with recorded by encoder signal, the main drive chart (Fig. 3) was obtained, which describes the capabilities of implementation of *modulation* in current working conditions depending on setting values of Fn and An. The cutting force at the frequency of *modulation* Fn ≥ 3 Hz doesn't effect on the spindle speed. Herewith, when cutting the depth of *modulation* practically doesn't depend on the value that is set on the *modulator*, because the reaction of drive in loading conditions depends on characteristics of the machine motor M1. However, the actual depth of cut reduces at the frequency Fn increase, since the inertial properties of the elements of main drive appears largely.

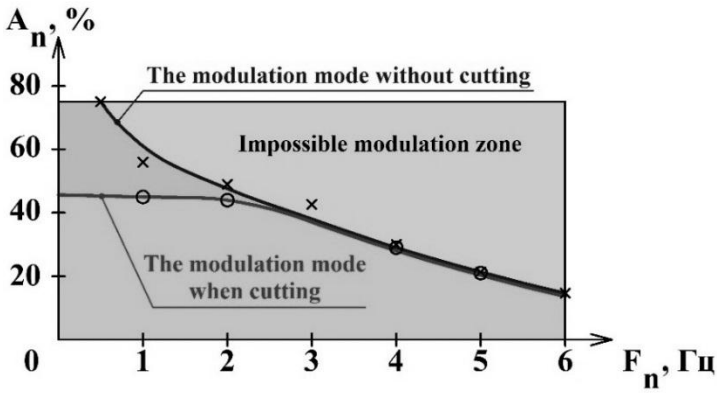


Figure 3 – Main drive chart

Further experiments with modulator working were conducted while cutting at self-excited vibrations occurring. The oscillogram of the tool vertical displacements and chart of changing the spindle speed are presented on Fig. 4. The turning was performed at the following conditions: t = 1,2 mm; So = 0,15 mm/rev; n_{sp} = 347 rev/min; D = 91,9 mm; V = 100 m/min; Fn = 0,5 Hz. The cutting was conducted by tool with next parameters: rake γ = -8º, flake α = 8º, major cutting edge angle φ = 90º, minor cutting edge angle φ_1 = 7º, nose radius r = 0,2 mm, flake wear fz = 0,2 mm, material of insert T5K10.

In this experiment 2 region of detail (10 mm longitude of each), successively turned: with and without the *modulation* respectively. In the first case the vibration amplitude was 321 μm. At the turning on the varying of the rotation spindle speed by *modulation*, the average value of Az became 212 μm. Although the oscillogram of displacement has periodically changing form, the overall vibration level decreases.

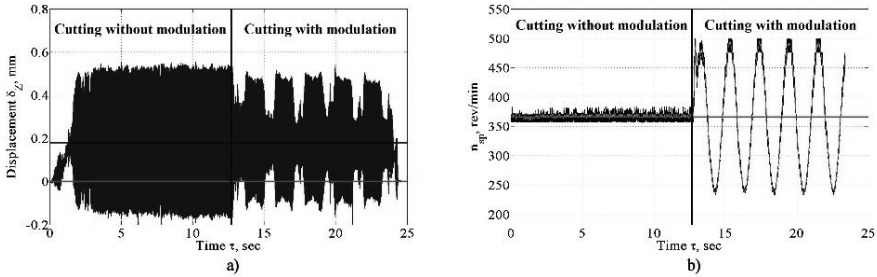


Figure 4 – Turning with the *modulation* at Fn = 0,5 Hz:
a) vertical tool displacements oscillogram; b) the spindle speed n_{sp} changing chart

Further research of the capabilities of the chatter suppression was passed by changing the modulation parameters. Since the depth An is strongly limited by the capabilities of main drive and weakly depend on set value by *modulator*, the influence of the modulation frequency Fn was investigated. Longitudinal turning of the blank (D = 89,3 mm) was conducted by changing the *modulation* frequency in range Fn = 0…10 Hz with step 1 Hz (turning 10 mm per each value). The cutting was performed in a single pass at next conditions: n_{sp} = 357 rev/min; V = 100 m/min; So = 0,15 mm/rev; t = 1,5 mm. As a result, the dependence of the vibration amplitude in vertical direction *Az* from the modulation frequency Fn was obtained (Fig. 5).

The chart shows that turning on the *modulation* at the cutting process straight reduces the vibration amplitude. However, further increasing of the frequency Fn doesn't lead to significant vibration level reducing.

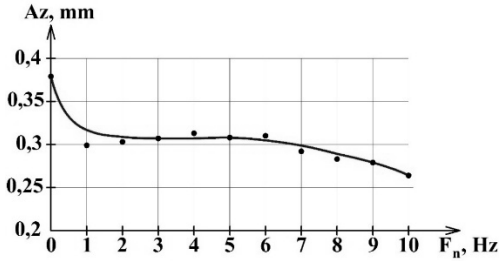


Figure 5 – The dependence of tool vibration amplitude Az from modulation frequency Fn

Inasmuch as the changing of the actual rotation speed occurs on the periodic law, the system customizes on this machining conditions so that the tool vibration level also changes periodically (Fig. 4a). The obtained results confirm the conclusions of the Afonina's work [8] that the modulation by a harmonic law is ineffective, because the reduction of the vibration amplitude is insignificantly (about 20%). In that work it is also said, that for the best chatter suppression when turning the conditions of the cutting speed varying with random changing of the modulation parameters must be used. To verify this fact in this research the turning with stochastic modulation frequency changing Fn was conducted at next conditions: t = 1,5 mm; So = 0,15 mm/rev; n_{sp} = 403 rev/min; D = 94,9 mm; V = 120 m/min. The turning was performed in single pass at Fn = 1 Hz with next random frequency changing law to Fn = 2 Hz (Fig. 6).

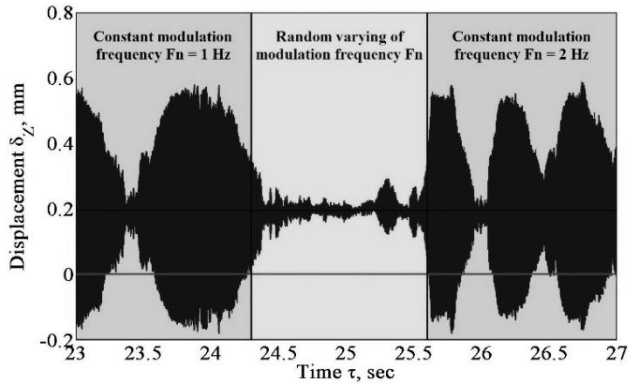


Figure 6 – Tool displacement oscillogram in vertical direction with random changing of the *modulation* frequency Fn

The experiment showed that random modulation frequency changing leads to significant reduction of the self-excited vibration level that also confirms the conclusions of the Afonina's work [8].

Thereby, at turning in the varying of the main motion speed conditions the reduction of the vibration level is observed. However, in view of the features of self-organization of self-excited vibrations it is necessary to conduct the further researches to find out the *modulation* conditions that allow suppressing chatter when turning as efficiently as possible.

Summary:

1. The cutting in continuous variation of the main motion speed conditions leads to reduction of self-excited vibration amplitude.

2. The cutting speed *modulation* with constant parameters Fn and An doesn't lead to significant decreasing of vibration level.

3. Stochastic spindle speed modulation mode is the most effective for chatter suppression in turning.

4. The further research is needed to find out the conditions that allow to reduce maximally the self-excited vibration in turning.

References: 1. *V.M. Svinin*: The milling with the cutting speed modulation, edited by *A.I. Promptov* / National Research Irkutsk State Technical Univercity, (2007). **2.** *A.A. Aphonin*: The increasing of the vibration stability of the technological system of lathe with applying of the adaptive main drive control / Thesis abstract of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, Tula. (1998). **3.** *M.G. Binder, I.A. Savinov, M.E. Elyasberg* Method of controlling cutting speed in machining with self-sustained vibrations, Soviet Unit Patent SU1465261. (1989). **4.** *N.A. Afonina, A.A. Afonin, A.B. Orlov* Auto-oscillation suppression method at part turning, Russian patent, RU2267381. (2006). **5.** *Y.N. Vnukov, S.I. Djadja, M. V. Kuchugurov and others*: The device for researching of the self-excited vibrations at turning / Information technologies in education, science and production, Odessa, Vol. 2(7), p.38-48. (2014). **6.** *Y.N. Vnukov, M.V. Kuchugurov, S.I. Djadja and others*: Method and device for researching the regenerative self-excited vibrations when turning / Cutting & Tool in technological system, International Scientific-Technical Collection, Kharkov, Vol. 83, p.42-54. (2013). **7.** *M.V. Kuchugurov*: Researching the phase shift ψ of regenerative vibration when turning / Engineering by the eyes of young: progressive ideas – science – manufacturing: abstracts XIV All-Ukrainian Youth Scientific and Technical Conference, Sumy (2014), p. 51-52. **8.** *N.A. Aphonina*: Increasing the vibration stability of turning base on controlled deviations the cutting speed / Thesis abstract of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, Tula. (2004).

УДК 621.923

И.Н. ПЫЖОВ, д-р техн. наук**,**
В.А. ФЕДОРОВИЧ, д-р техн. наук, Харьков,
В.Г. КЛИМЕНКО, Полтава, Украина

3D МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ АЛМАЗНЫХ КАРАНДАШЕЙ

Розглянуто питання, пов'язані з особливостями формування напружено-деформованого стану системи «алмазний полікристал - металофаза - металеве покриття». Показано визначальну роль властивостей метала-каталізатора, його процентного вмісту в алмазі, модуля пружності металевого покриття на алмазі в умовах високотемпературного режиму пайки алмазу в корпусі олівця. Встановлено залежність напружень в системі від зазначених факторів і дані практичні рекомендації по виготовленню олівця.
Ключові слова: алмазний олівець, люта, металофаза, металеве покриття, 3D моделювання, напружено-деформований стан, теплонапруженість процесу, еквівалентні напруги

Рассмотрены вопросы, связанные с особенностями формирования напряженно-деформированного состояния системы «алмазный поликристалл – металлофаза - металлическое покрытие». Показана определяющая роль свойств металла–катализатора, его процентного содержания в алмазе, модуля упругости металлического покрытия на алмазе в условиях высокотемпературного режима пайки алмаза в корпусе карандаша. Установлена зависимость напряжений в системе от указанных факторов и даны практические рекомендации по изготовлению карандаша.
Ключевые слова: алмазный карандаш, припой, металлофаза, металлическое покрытие, 3D моделирование, напряженно-деформированное состояние, теплонапряженность процесса, эквивалентные напряжения

The questions linked to the peculiarities of deflected mode of the system "diamond polycrystalline – metallic phase – metal coating" are considered. The defining role of metal- catalyst properties, its percentage content in the diamond, modulus of elasticity of metal coating on the diamond under conditions of high-temperature mode of soldering of diamond in diamond dresser body are shown. It is revealed how stress depends on the above-pointed factors in the system, practical recommendations for the production of diamond dressers are proposed as well.
Keywords: diamond dresser, solder alloy, metallic phase, metallic coating, 3D modeling, deflected mode, thermal intensity of process, reduced stress

1. Постановка проблемы. Известно, что при шлифовании изделий из различных обрабатываемых материалов (ОМ) широко распространена правка рабочей поверхности абразивных кругов алмазными карандашами. Правка абразивных кругов является одной наиболее распространенных областей использования как монокристаллов (природных и синтетических) так и синтетических поликристаллических алмазов (СПА). И до сих пор достаточно остро стоит задача замены природных алмазов синтетическими без снижения показателей эффективности процесса правки в целом. В связи с

© И.Н. Пыжов, В.А. Федорович, В.Г. Клименко, 2016

этим исследования в данной предметной области следует считать актуальными и важными для промышленности.

Задачу повышения эффективности процесса правки абразивных кругов можно разделить на два основных направления [1]. Первое направление связано с совершенствованием методов определения оптимальных условий на этапе изготовления алмазных карандашей, а второй – на этапе их эксплуатации. В данной работе рассматривается первое направление.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Известно [2, 3], что использование компьютерных информационных технологий на всех этапах жизненного цикла изделий (а, значит, и алмазных карандашей) рассматривается как приближение к идеологии CALS-технологии (Computer-Aided Logistics Support). Они обеспечивают компьютерное управление жизненным циклом изделия на всех этапах: разработки концепции изделия; проведения научно-исследовательских работ; проектирования, производства; эксплуатации изделия; модернизации изделия; обеспечения ремонта и технического обслуживания изделия; утилизации.

В настоящее время отсутствует единая комплексная методология трёхмерного (3D-CAD) моделирования физических процессов алмазно-абразивной и лезвийной обработок. Однако уже наметилась четкая тенденция для ее разработки [2], [3]. В перспективе это позволит существенно сократить объём экспериментальных исследований для определения рациональных конструктивных параметров алмазно-абразивных и лезвийных инструментов, оптимальных условий их изготовления и использования. Реализация предложенной последовательности экспериментальным путем является чрезвычайно трудоемким и дорогостоящим процессом.

В нашем случае использование компьютерных технологий на обоих указанных направлениях дает возможность уменьшить время на исследование напряженно - деформированного состояния (НДС) систем «металлическое покрытие - СПА - металлофаза» и «связка круга - алмазное зерно - металлическое покрытие - металлофаза - ОМ », а, следовательно, повысить эффективность научных работ.

В настоящей статье для реализации поставленных задач изучения НДС в зоне обработки и в процессе изготовления инструмента были использованы расчетные комплексы ANSYS, LS-DYNA, Third Wave AdvantEdge, CosmosWorks, Abaqus предназначенные для исследовательских расчетов методом конечных элементов. Для построения 3D-моделей, имитирующих упомянутые процессы, применялась САПР в трёх измерениях (SolidWorks).

3. Цель исследования. Установление влияния основных факторов процесса пайки алмазных карандашей на НДС системы «металлическое покрытие - СПА - металлофаза».

4. Основные материалы исследования. Известно, что основным методом закрепления алмаза в корпусе карандаша является пайка с

использованием различных, в том числе и достаточно высокотемпературных припоев. В связи с этим основной проблемой при изготовлении алмазного карандаша является высокая температура пайки. Если в алмазе имеются металлические включения (металлофаза), коэффициент линейного расширения которых во многом превышает аналогичный показатель алмаза, то в условиях высокотемпературного воздействия в последнем могут возникать напряжения, величины которых могут превысить предел прочности алмаза. Как следствие, происходит разрушение (растрескивание) СПА [4]. В результате этого алмаз разрывается как бы изнутри [5]. Чем выше коэффициент термического расширения металлофазы, тем больше должны быть напряжения в СПА и тем больше вероятность его разрушения в процессе изготовления или эксплуатации карандаша. Применительно к алмазному карандашу это недопустимо, т.к. может привести как к снижению общего срока его службы, так и браку при обработке (правке). Следует отметить, что в условиях высоких температур важную роль начинают играть физико-механические свойства других факторов, которые входят в отмеченные выше системы.

Известно, что одним из способов защиты алмаза от разрушения является нанесение на их поверхность рельефных толстослойных металлических покрытий [6]. Их наличие на зерне способствует продлению ресурса алмаза по причине лучшего удержания в связке (припое), предотвращению образования в нем макротрещин, «залечиванию» уже имеющихся микротрещин и т.д. Данные последних исследований показали, что еще одним ценным свойством металлического покрытия является способность защитить алмаз (в случае нахождения внутри него металлофазы) от разрушения при воздействии на него высоких температур [7]. Нами было высказано предположение, что аналогичный эффект от покрытия будет наблюдаться и применительно к СПА достаточно крупных размеров.

Для установления влияния различных факторов на НДС системы при пайке алмаза в корпус карандаша было использовано математическое планирование эксперимента. В частности был реализован план второго порядка типа В4. В качестве факторов были приняты: процентное содержание металлофазы (М, %), модуль упругости покрытия на алмазе (μ, Н/м$^{2)}$, коэффициент термического расширения металла-катализатора (КТР, 1/К), температура пайки алмаза (Т, ^{0}С), значения которых представлены в табл. Эти факторы, как показали ранее выполненные исследования [2], оказывают определяющее влияние на уровень НДС в системе «металлическое покрытие - СПА – металлофаза». Толщина покрытия принималась равной 0,1 мм [8].

Отметим, что модель нагружалась только температурным фактором, поскольку при пайке силовой фактор практически отсутствует.

Таблица – Уровни варьирования факторов плана В4

Уровни варьирования факторов	Факторы							
	Содержание металлофазы М, %		Модуль упругости покрытия при 900 ^{0}С μ, Н/м^2		КТР металла-катализатора (при 900 ^{0}С), 1/К		Температура пайки Т, ^{0}С)	
	Натуральное значение, %	Кодированное значение Х1	Натуральное значение, Н/м^2	Кодированное значение Х2	Натуральное значение, 1/К	Кодированное значение Х3	Натуральное значение, ^{0}С	Кодированное значение Х4
Верхний уровень	10	+1	3.0E+011	+1	45.0E-06	+1	1400	+1
Основной уровень	5	0	2.0E+011	0	25.0E-06	0	1000	0
Нижний уровень	0	-1	1.0E+011	-1	5.0E-06	-1	600	-1

На рис. 1 представлена визуализация результатов моделирования по влиянию выбранных факторов на НДС зоны пайки алмазного карандаша.

Эти данные показывают картину распределения напряжений в системе «металлическое покрытие – СПА – металлофаза». Они наглядно свидетельствуют, что наибольшие напряжения при нагревании сконцентрированы в области металлофазы и именно она играет ключевую роль в разрушении алмазных зерен в процессе спекания алмазно-абразивного инструмента. При расположении включений металлофазы вблизи друг от друга наблюдается усиление полей напряжений в результате их наложения, а их распространение достигает 40% от объема зерна. Это, как правило, приводит к разрушению значительного объема алмазного зерна.

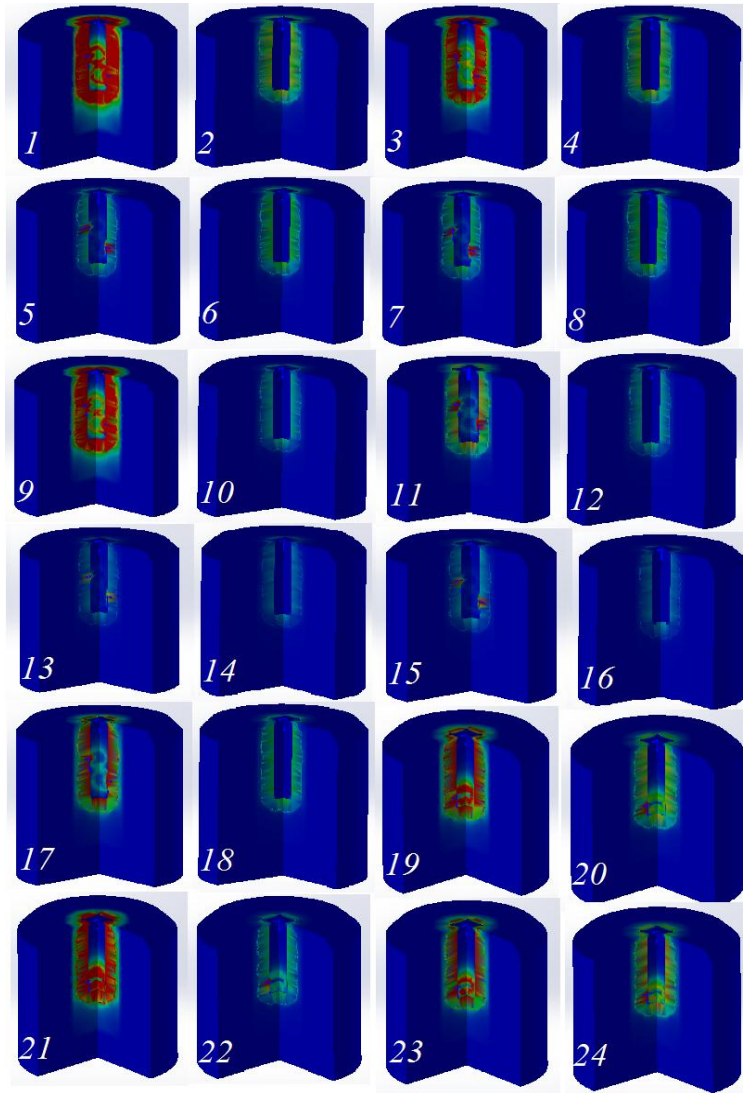
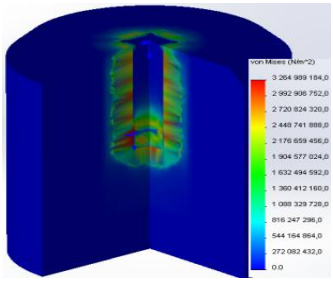
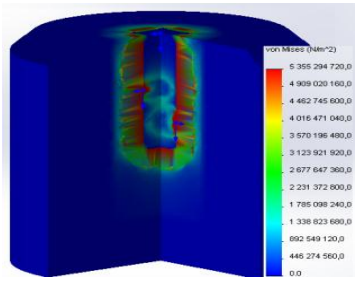


Рисунок. 1 – Визуализация результатов моделирования НДС системы «металлическое покрытие – СПА – металлофаза»





а) $\mu = 2 \cdot 10^{+11}$ Н/м^2 б) $\mu = 3 \cdot 10^{+11}$ Н/м^2

Рисунок 2 – Влияние модуля упругости покрытия на НДС системы «металлическое покрытие – СПА – металлофаза»

На рис. 2 представлена визуализация НДС системы «металлическое покрытие – СПА – металлофаза» в зависимости от модуля упругости (μ) металлического покрытия. Моделирование показало, что с повышением значения μ напряжения в системе возрастают. Этот факт можно считать подтверждением того, что покрытие на алмазе может играть защитную функцию в условиях высокотемпературного процесса пайки СПА в державке алмазного карандаша.

Очевидно, что в случае нахождения в составе СПА минимального количества металлофазы (или при ее практическом отсутствии) НДС системы будет минимально (ввиду отсутствия очага возникновения значительных напряжений), что подтверждается результатами моделирования (опыты 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 и 18). Учитывая, что предел прочности алмаза на растяжение составляет примерно 2,0 ГПа, можно сделать вывод о том, что СПА, в составе которых практически нет металлофазы, при пайке с температурой ≤1500 ˚С не должны претерпевать микро - или макроразрушение, что позволяет использовать для их пайки высокотемпературные (и, как правило, высокопрочные, хорошо удерживающие алмаз в державке) марки припоев, что очень важно с точки зрения технологии изготовления правящих карандашей. Таким образом, данные, представленные на рисунках 1 и 2, подтверждают тот факт, что максимальные напряжения концентрируются на границах включений металлофазы. В случае превышения ими предела прочности алмаза может инициироваться процесс развития внутренних трещин в СПА, которые, в свою очередь, могут привести к макроразрушению поликристалла в целом (т.е. к отбраковке изделия).

Здесь следует отметить, что уже существуют способы изготовления синтетических поликристаллов алмаза, которые практически не имеют в своем составе металлофазы, а по физико-механическим свойствам в

максимальной степени приближаются к природным алмазам. Сюда в первую очередь можно отнести CVD метод получения СПА (химическое осаждение из газовой фазы) [9]. Кроме отмеченного выше важным достоинством СПА является отсутствие необходимости ориентации алмаза при закреплении в державке инструмента, поскольку в силу поликристаллического строения СПА имеют одинаковую микротвердость в любом направлении. Такие алмазы в ближайшее время позволят решить актуальнейшую проблему замены природных алмазов во многих отраслях народного хозяйства.

Обработка результатов планируемого многофакторного эксперимента позволила получить математическую модель (в кодированных значениях), адекватно описывающую процесс пайки алмазных карандашей на базе использования различных марок СПА с металлическими рельефными толстослойными покрытиями.

Эта математическая модель процесса пайки алмаза в корпусе карандаша позволяет производить его проверку на не превышение критической температуры и таким образом обеспечить целостность СПА на этапе изготовления алмазного карандаша.

Выводы и перспективы развития. 1. Подтверждена определяющая роль температурного фактора в создании уровня НДС системы «металлическое покрытие - СПА - металлофаза». 2. Подтверждена важная роль количества и коэффициента термического расширения металлофазы в условия высокотемпературного процесса пайки СПА в державке алмазного карандаша. 3 . Подтверждена важная роль величины модуля упругости металлического покрытия с точки зрения обеспечения целостности СПА при пайке СПА в корпусе алмазного карандаша. 4. Подтверждена перспективность использования алмазов, полученных методом CVD в различных инструментах, при изготовлении которых используются высокотемпературные режимы.

В дальнейшем представляет определенный интерес вопрос оптимизации процесса изготовления алмазных карандашей на базе полученной математической модели процесса их пайки.

Список использованных источников: **1.** *Грабченко А. І.* Деякі особливості дослідження напружено-деформованого стану при виготовленні та експлуатації алмазних вигладжувачів / *А. І. Грабченко, І. М. Пижов, Н. В. Рязанова – Хитровська, В. Г. Клименко* // Машинобудування україни очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво». Матеріали XV Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції. -м. Житомир: 2015. –С. 22-24**.** **2.** *Грабченко А. И.* 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования : учеб. пособие / *А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, В. А. Федорович*. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2006. – 364 с. **3.** *Криворучко Д. В.* Моделирование процессов резания методом конечных элементов : методологические основы : монография / *Д. В. Криворучко, В. А. Залога.* Под общей редакцией В. А. Залоги – Сумы: Университетская книга, 2012. – 450с. **4.** *Новиков Н. В.* Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов / *Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н.* – К.: Наук. думка, 1993. – 220 с. **5.** *Козакова Н. В.* 3D моделирование при определении оптимальных характеристик алмазных кругов / *Козакова Н. В., Наконечный Н. Ф.,*

Федорович В. А. // Високі технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – Вип. 1(8). – С. 81-86. **6.** Синтетические алмазы в машиностроении / [*Бакуль В. Н., Гинсбург Б. И., Мишнаевский Л. Л. и др*.]; под ред. *В. Н. Бакуля*. - К.: Наукова думка, 1976.–-352 с. **7.** *Пыжов И. Н.* Научные основы формообразования лезвийных инструментов из поликристаллических сверхтвердых материалов: Дис. … д-ра техн. наук: 05.03.01 / *Пыжов Иван Николаевич*. – Харьков, 2009. – 405 с. **8.** Пат. 74681 Україна, МПК (2012.01) B24 B 53/00. Спосіб виготовлення алмазного олівця / *Грабченко А. І., Пижов І. М., Федорович В. О., Клименко В. Г.* Власник Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кодратюка - № u 2012 04084; заявл. 03.04.2012; опубл. 12.11.2012. Бюл. № 21. **9.** *Пыжов И. Н.* Состояние вопроса и перспективы применения алмазов, полученных методом CVD / *И. Н. Пыжов, А. В. Васильев, В. Г. Клименко* // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: 2011. – Вып.80. – С. 226-235.

Bibliography (transliterated): 1. *Grabchenko A. I.* Dejaki osoblivosti doslidzhennja napruzheno-deformovanogo stanu pri vigotovlenni ta ekspluatacií almaznih vigladzhuvachiv / *A. I. Grabchenko, I. M. Pizhov, N. V. Rjazanova – Hitrovs'ka, V. G. Klimenko* // Mashinobuduvannja Ukraïni ochima molodih: progresivni ideï – nauka – virobnictvo». Materiali XV Vseukraïns'koï molodizhnoï naukovo-tehnichnoï konferencií. – m. Zhitomir: 2015. – S. 22-24. **2.** *Grabchenko A. I.* 3D modelirovanie almazno-abrazivnyh instrumentov i processov shlifovanija : ucheb. posobie / A. I. *Grabchenko, V. L. Dobroskok, V. A. Fedorovich*. – Har'kov : NTU «HPI», 2006. – 364 s. **3.** *Krivoruchko D. V.* Modelirovanie processov rezanija metodom konechnyh jelementov : metodologicheskie osnovy : monografija / *D.V. Krivoruchko, V.A. Zaloga*. Pod obshhej redakciej *V.A. Zalogi* – Sumy: Universitetskaja kniga, 2012. – 450s. **4.** *Novikov N. V.* Soprotivlenie razrusheniju sverhtverdyh kompozicionnyh materialov / *Novikov N.V., Majstrenko A.L., Kulakovskij V.N*. – K.: Nauk. dumka, 1993. – 220 s. **5.** *Kozakova N. V.* 3D modelirovanie pri opredelenii optimal'nyh harakteristik almaznyh krugov / *Kozakova N.V., Nakonechnyj N.F., Fedorovich V.A.* // Visoki tehnologiï v mashinobuduvanni. – Harkiv: NTU «HPI». – 2004. – Vip. 1(8). – S. 81-86. **6.** Sinteticheskie almazy v mashinostroenii / [*Bakul' V. N., Ginsburg B. I., Mishnaevskij L. L. i dr*.]; pod red. *V.N. Bakulja*. - K.: Naukova dumka, 1976. – 352 s. **7.** *Pyzhov I.N.* Nauchnye osnovy formoobrazovanija lezvijnyh instrumentov iz polikristallicheskih sverhtverdyh materialov: Dis. … d-ra tehn. nauk: 05.03.01 / *Pyzhov Ivan Nikolaevich*. – Har'kov, 2009. – 405 s. **8.** Pat. 74681 Ukraïna, MPK (2012.01) V24 V 53/00. Sposib vigotovlennja almaznogo olivcja / *Grabchenko A.I., Pizhov I.M., Fedorovich V.O., Klimenko V.G. Vlasnik* Poltavs'kij nacional'nij tehnichnij universitet imeni Jurija Kodratjuka - № u 2012 04084; zajavl. 03.04.2012; opubl. 12.11.2012. Bjul. № 21. **9.** *Pyzhov I. N.* Sostojanie voprosa i perspektivy primenenija almazov, poluchennyh metodom CVD / *I.N. Pyzhov, A.V. Vasil'ev, V.G. Klimenko* // Rezanie i instrument v tehnologicheskih sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. – Har'kov: 2011. – Vyp.80. – S. 226-235.

УДК621.9.06.-229.331

А.А ЯКИМОВ, д-р техн. наук, ***В.М. ТОНКОНОГИЙ,*** д-р техн. наук,
Л.В. БОВНЕГРА, канд. техн. наук,
В.М. ТИГАРЕВ, канд. техн. наук, Одесса, Украина

РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЕРЫВИСТЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ НА КЕРАМИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ

Теоретично обгрунтована можливість мінімізації часових і матеріальних витрат на виготовлення переривистих кругів на керамічній в'язці за рахунок зменшення кількості западин з одночасним збільшенням коефіцієнта уривчастості. Запропонований склад твердого мастила, що наноситься на робочу поверхню переривистого круга, поліпшуючий шорсткість оброблюваної поверхні і що знижує температуру в зоні різання.
Ключові слова: виготовлення переривистих кругів, мінімізація витрат

Теоретически обоснована возможность минимизации временных и материальных затрат на изготовление прерывистых кругов на керамической связке за счет уменьшения количества впадин с одновременным увеличением коэффициента прерывистости. Предложен состав твердой смазки, наносимой на рабочую поверхность прерывистого круга, улучшающий шероховатость обрабатываемой поверхности и снижающий температуру в зоне резания.
Ключевые слова: изготовление прерывистых кругов, минимизация затрат

The possibility of minimization time and material inputs on production of faltering circles on the ceramic sheaf due to reduction quantity of hollows with simultaneous increase in coefficient of intermittence is theoretically proved. The composition of the solid greasing applied on a working surface of a faltering circle, improving a roughness of the processed surface and reducing temperature in a cutting zone is offered.
Keywords: production of faltering circles, minimization time and material inputs

Постановка проблемы. Общеизвестны существенные преимущества шлифовальных кругов с прерывистой рабочей поверхностью, которые позволяют существенно понизить температуру в зоне резания и, как следствие, снизить вероятности появления прижогов и растягивающих напряжений в поверхностном слое шлифованных деталей. Однако такие круги в силу ряда причин находят весьма ограниченное применение. К факторам, сдерживающим широкое применение прерывистых кругов, относятся: повышенная шероховатость поверхности; колебания, под действием которых может ухудшиться макрогеометрия обработанной поверхности; сложность формирования впадин на рабочей поверхности абразивного инструмента. Наибольшее распространение получило формирование впадин на круге путем их прорезания на заточном станке. Однако этот способ малопроизводителен, материало- и энергоемок (рис. 1).

© А.А Якимов., В.М. Тонконогий, Л.В. Бовнегра, В.М. Тигарев, 2016

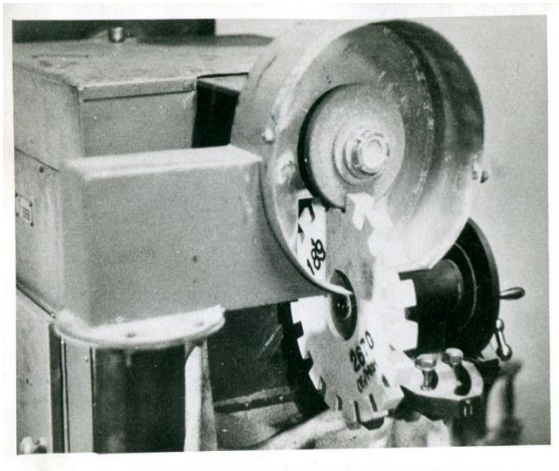


Рисунок 1 – Прорезание пазов на шлифовальном круге на заточном станке

Альтернативным решением является применение композиционных шлифовальных кругов, в которых прорези заполняют в процессе их изготовления твердым смазочным материалом. Это решение позволяет транспортировать твердый смазочный материал непосредственно в зону шлифования и повысить динамическую устойчивость процесса шлифования. Но композиционные круги не могут в полной мере конкурировать с прерывистыми кругами, так как последние обладают высокой режущей способностью, связанной с возникновением в упругой системе станка высокочастотных колебаний, существенно улучшающих условия стружкообразования. Технология изготовления композиционных кругов имеет те же недостатки, что и технология изготовления прерывистых кругов. Пазы прорезаются на заточных станках, оснащенных делительными устройствами. Технология изготовления прерывистых и композиционных кругов на керамической связке более производительным методом – прессованием не разработана.

Цель работы. Целью данной работы является найти пути расширения возможности применения прерывистого абразивного инструмента на керамической связке.

Основные материалы исследования. Параметрическая неустойчивость упругой системы станка при прерывистом шлифовании определяется условием [2]:

$$|L| > \frac{1+M}{2} \qquad (1)$$

$$\text{где } L = \frac{e^{-h(\tau_1+\tau_2)}}{h\left(k_2 + h\sin 2k_2\tau_1\right)}\Big[k_1^2 \sin k_1\tau_1 \sin k_2\tau_2 - 2\cdot k_1\cdot k_2\cdot\cos k_2\tau_1\cdot\cos k_1\tau_1\cdot\cos k_2\left(\tau_1+\tau_2\right) -$$

$$-k_2^2 \sin k_1\tau_1 \sin\left(2\cdot k_2\tau_1 + k_2\tau_2\right)\Big]; \qquad (2)$$

$$M = \frac{k_1 k_2 e^{-2h(\tau_1+\tau_2)}\cos\left(2\cdot k_2\cdot\left(\tau_1+\tau_2\right)\right)}{h\left(k_2 + h\sin 2k_2\tau_1\right)}, \qquad (3)$$

$$k_1 = \sqrt{\frac{C_o}{m} + \frac{C_o\cdot\left(\frac{t_л}{t_ф} - 1\right)}{2\cdot m} - h^2}\ , k_2 = \sqrt{\frac{C_o}{m} - \frac{C_o\cdot\left(\frac{t_л}{t_ф} - 1\right)}{2\cdot m} - h^2}\ ;$$

τ_1, τ_2 – времена прохождения над обрабатываемой поверхностью выступа и впадины прерывистого круга соответственно, с; $t_л$ – глубина резания, установленная по лимбу, м; $t_ф$ – фактическая глубина резания, м; C_o – приведенная жесткость упругой системы станка, Н/м; h – величина, характеризующая угасание колебаний во времени, 1/с.

Для выявления влияния геометрических характеристик прерывистого круга на параметрическую устойчивость упругой системы станка были произведены соответствующие расчеты по формулам (1), (2), (3). Результаты расчетов приведены на рис. 2.

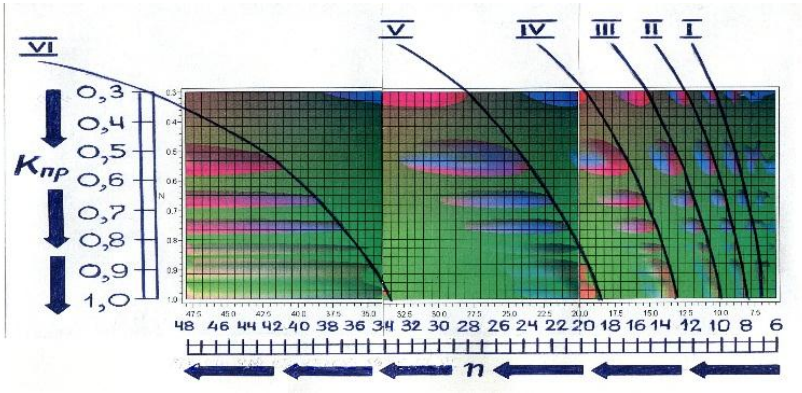


Рисунок 2 – Области параметрической неустойчивости упругой системы станка в виде эллипсов и границы зон устойчивой работы в виде кривых V1, V, IV, III, II, I. Расчеты произведены для $t_л / t_ф = 2$ (для неимпрегнированного круга)

На рис. 2 области параметрической неустойчивости упругой системы станка выглядят в виде эллипсных пятен, находящихся в плоской системе координат, в которой по оси абсцисс отложены количества прорезей на рабочей поверхности абразивного инструмента, а по оси ординат – величины отношений $K_{пр}$ ширины прорези l_2 к длине режущего выступа l_1. Промежутки между пятнами – области, в которых не возникает параметрический резонанс. Кривые I, II, III, IV, V, VI – это правые границы этих областей (левые границы не показаны). Из характера кривых, очерчивающих области параметрической устойчивости, следует, что при увеличении коэффициента прерывистости $K_{пр} = l_2 / l_1$ необходимо уменьшать количество прорезей на прерывистом круге n. Например, при увеличении коэффициента $K_{пр}$ от 0,3 до 1,0 количество прорезей n на круге уменьшается от 50 до 33 (рис.2, кривая VI). Уменьшение числа впадин на рабочей поверхности прерывистого абразивного инструмента приводит к снижению трудоемкости его изготовления.

На рис. 3 представлено семейство кривых, каждая точка которых является такой совокупностью коэффициента прерывистости $K_{пр}$ и числа прорезей n, при которой обеспечивается требуемая степень понижения температуры прерывистого шлифования по сравнению со сплошным [3].

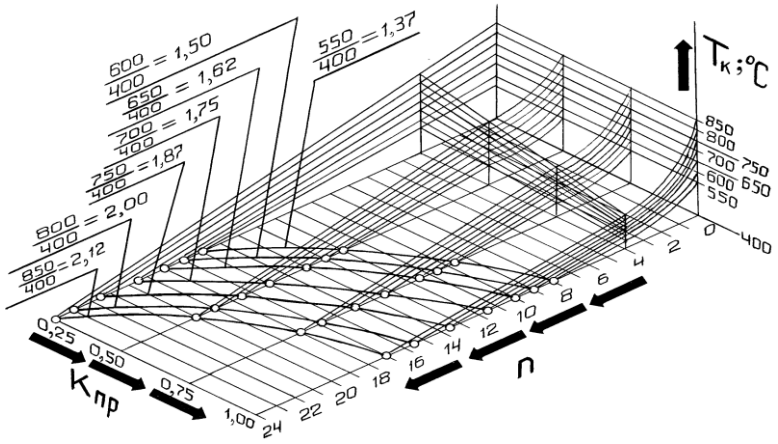


Рисунок 3 – Семейство кривых в координатной плоскости ($k_{пр}; n$), представляющих собой геометрические множества точек, каждая из которых является совокупностью геометрических характеристик ($k_{пр}; n$) макрорельефа рабочей поверхности прерывистого шлифовального круга, обеспечивающих понижение температуры прерывистого шлифования до 400°С по сравнению с температурами сплошного шлифования 850°С; 800°С; 750°С; 700°С; 650°С; 600°С; 550°С

Кривые из рис. 3 и кривые I, II, III, IV, V, VI (рис. 2) имеют одинаковый характер.

Из рис. 3 следует, что для снижения температуры сплошного шлифования от 550°С до 400°С за счет применения прерывистого круга необходимо, чтобы совокупность геометрических параметров его рабочей поверхности ($K_{пр}$ и n) соответствовала точке на кривой, помеченной на рисунке надписью: $\frac{550}{400}=1,37$. Из анализа этой кривой следует, что для обеспечения требуемой степени понижения температуры необходимо при увеличении коэффициента прерывистости $K_{пр}$ от 0,25 до 1,00 уменьшить число впадин n от 16 до 8.

Из рис. 3 следует, что для обеспечения большей степени снижения температуры требуется увеличивать число прорезей на прерывистом круге. Известно [4], что при увеличении коэффициента прерывистости $K_{пр}$ увеличивается шероховатость обрабатываемой поверхности.

Обеспечить большую степень понижения температуры и улучшить шероховатость обработанной поверхности можно импрегнированием рабочей поверхности абразивного инструмента (с помощью карандашей твердой смазки) или импрегнированием всего шлифовального круга (т.е. насыщением пор инструмента специальными веществами, улучшающими его режущие свойства) [5-7].

Экспериментальные значения мощности N, затрачиваемой на резание, при шлифовании стали 48А обычным кругом ПП 250×20×76 24 А25 СМ26 К5 и кругом той же характеристики, импрегнированным контактным способом, на режиме $V_{kp}=35$ м/с; $V_{заг}=10$ м/мин; $t=0,02;$ 0,03; 0,04 мм приведены в табл. [8].

Таблица

t ,мм	*Вт*		$\frac{N_{имп.}}{N}$
	N	$N_{имп.}$	
0,02	220	150	0,682
0,03	350	250	0,714
0,04	650	450	0,692

Импрегнирование контактным способом осуществлялось прижимом брикета твердой смазки к рабочей поверхности вращающегося абразивного круга. Состав твердой смазки защищен авторским свидетельством [9]. Состав содержит следующие компоненты:

Стеариновая кислота……. 60-65%
Олеиновая кислота……. 20-25%
Ацетамид……. Остальное

Из табл. видно, что шлифование импрегнированным кругом протекает с меньшими энергозатратами по сравнению со шлифованием обычным кругом. Известно [5-7], что импрегнирование шлифовальных кругов существенно улучшает их режущую способность. Режущая способность абразивного круга может быть оценена величиной отношения глубины резания, установленной по лимбу станка $t_л$, к фактической глубине резания $t_ф$. Чем меньше величина этого отношения отличается от единицы, тем лучше режущая способность абразивного круга. Оценку влияния величины отношения $t_л/t_ф$ на параметрическую устойчивость упругой системы станка можно провести, сопоставляя рис. 2 и 4.

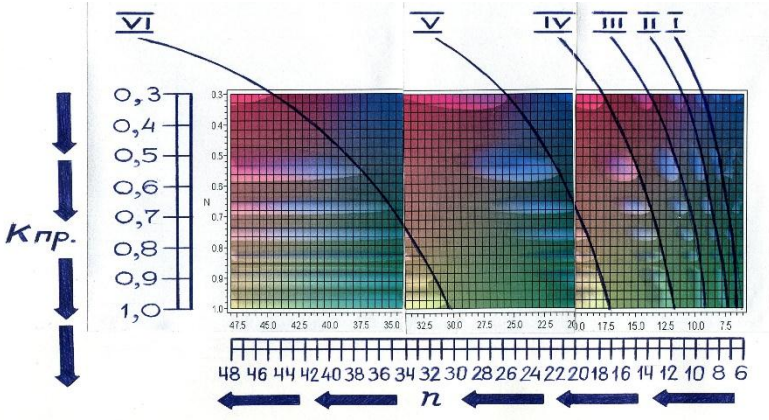


Рисунок 4 – Области параметрической неустойчивости упругой системы станка в виде эллипсов и границы зон устойчивой работы в виде кривых V1, V, IV, III, II, I.
Расчеты произведены для $t_л/t_ф = 1{,}5$
(для круга, на рабочую поверхность которого нанесена твердая смазка)

На рис. 2 и рис. 4 границы зон устойчивой работы (кривые V1, V, IV, III, II, I) представляют собой геометрическое множество точек, каждая из которых является совокупностью геометрических характеристик ($K_{пр}, n$) макрорельефа рабочей поверхности прерывистого круга.

Из сопоставления рис. 2 и рис. 4 следует, что за счет нанесения на рабочую поверхность круга твердой смазки (т.е. за счет уменьшения величины отношения $t_л/t_ф$) можно добиться смещения границ зон устойчивой работы упругой системы станка в сторону уменьшения количества впадин на прерывистом круге. Уменьшение числа прорезей на

абразивном инструменте приводит к снижению временных и материальных затрат на изготовление прерывистых кругов.

Известно [5], что при жидкостной пропитке абразивных кругов их объемная плотность и масса увеличиваются в зависимости от марки импрогнатора от 5 до 30%. На рис. 5 [5] показано изменение объемной плотности кругов после их жидкостного импрегнирования радонидом аммония РА (2), раствором хлорсульфидного полиэтилена ХСПЭ в растворе толуола (3), латексом марки ДММА (4), многофункциональной присадкой Л326 (5), серой кристаллической в расплаве (6).

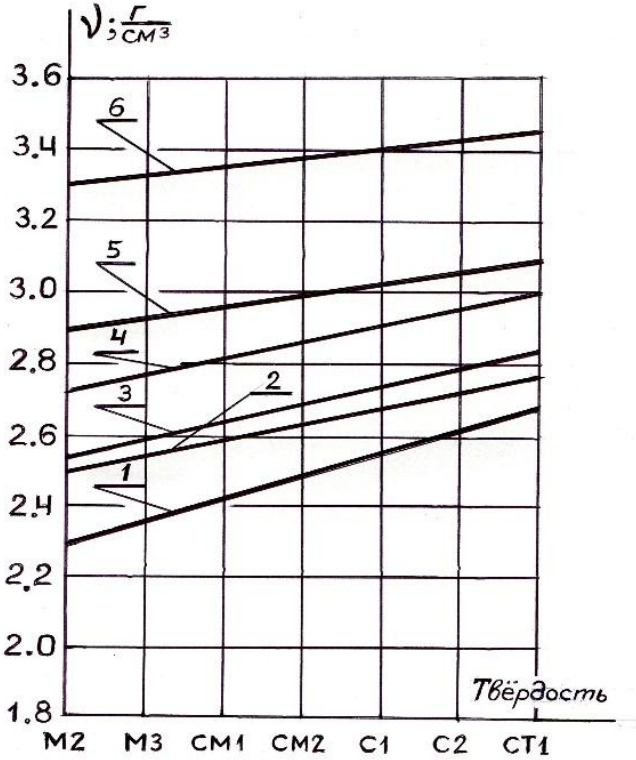


Рисунок 5 – Изменение плотности кругов после импрегнирования:
1) круг не импрегнирован; 2) РА; 3) ХСПЭ; 4) ДММА; 5) Л326; 6) Сера

Сопоставление рис. 6 и рис. 4 дает возможность выяснить характер изменения параметрической неустойчивости упругой системы станка при увеличении массы шлифовального круга на 30%.

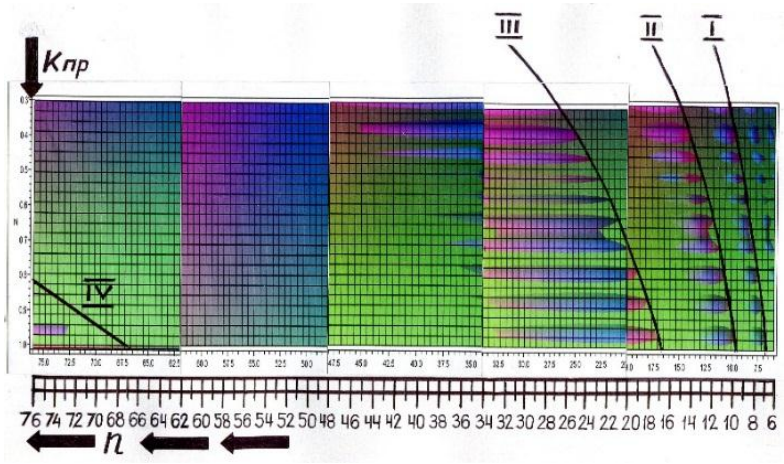


Рисунок 6 – Параметрическая неустойчивость упругой системы станка при шлифовании прерывистыми кругами после их жидкостного импрегнирования кристаллической серой в расплаве

При работе прерывистых кругов, на рабочие поверхности которых нанесена твердая связка, в районе относительно малых чисел впадин ($6 \le n \le 35$) можно выделить две зоны устойчивой работы упругой системы станка: правее кривой VI и правее кривой V (рис. 4).

При работе прерывистых кругов, жидкостно импрегнированных кристаллической серой, в районе относительно малых чисел впадин ($6 \le n \le 35$) просматривается только одна зона устойчивой работы упругой системы станка: правее кривой III (рис.6), зато в районе больших чисел впадин ($35 \le n \le 72$) – сплошная устойчивая зона. Это говорит о том, что прерывистые круги с малым числом прорезей ($6 \le n \le 35$) пропитывать не рекомендуется. А работа импрегнированных кругов с большим числом впадин ($35 \le n \le 72$) – не сопровождается параметрическим резонансом, но изготовление этих инструментов связано с большими временными и материальными затратами.

Использование серы в качестве жидкого импрегнатора имеет ряд недостатков. Сера характеризуется высокой вязкостью и пониженной жидкотекучестью. Поэтому для уменьшения неравномерности заполнения серой пор по объему абразивного инструмента необходимо пропитку осуществлять в вакууме с последующей подачей давления, а это требует специального дорогостоящего оборудования и специальных производственных площадей. Кроме того, даже используя вакуумную

установку величина дисбаланса кругов после пропитки серой в три раза превышает величину дисбаланса до пропитки [5].

Кроме того, в процессе шлифования кругами, пропитанными серой, выделяется неприятный запах, что ухудшает экологичность на рабочем месте.

Способ нанесения на рабочую поверхность круга твердой смазки непосредственно в процессе шлифования достаточно прост в реализации, а использование состава твердой связки [9] при шлифовании прерывистыми кругами с малым числом впадин позволяет сократить время и затраты на их прорезание.

Из сопоставления графических данных, приведенных на рис. 2 (не импрегнированный круг), рис. 4 (круг с нанесенной на его рабочую поверхность твердой смазкой) и рис. 6 (импрегнированный круг с увеличенной массой) следует, что нанесение твердой смазки на рабочую поверхность абразивного инструмента приводит к смещению областей параметрической неустойчивости (эллипсоподобных пятен) и зон устойчивой работы упругой системы станка (промежутков между эллипсами) в сторону уменьшения числа прорезей на прерывистом круге. При этом размеры этих областей (эллипсов) и зон (промежутков между ними) остаются неизменными. Увеличение массы шлифовального круга, произошедшее из-за его импрегнирования, приводит к растягиванию как эллипсов, так и промежутков между ними в направлении увеличения числа прорезей на рабочей поверхности инструмента. Причем с увеличением числа впадин величина растяжения возрастает. Например, районы, ограниченные кривыми I и II, II и III, III и IV растянулись соответственно в 2,7 раза, в 4,2 раза и в 9,3 раза соответственно.

Выводы

1. Установлено, что с увеличением количества прорезей на рабочей поверхности абразивного инструмента увеличиваются размеры зон параметрической устойчивости упругой системы станка и возрастает степень понижения температуры прерывистого шлифования по сравнению со сплошным.

2. Установлено, что зоны параметрической устойчивости упругой системы станка и линии, соответствующие совокупностям чисел прорезей и коэффициентов прерывистости, обеспечивающим одинаковую степень снижения температуры прерывистого шлифования по сравнению со сплошным, имеют одну и ту же искривленность, что позволяет при проектировании прерывистых кругов уменьшать число прорезей с одновременным повышением величины отношения ширины впадины к длине режущего выступа. Уменьшение количества прорезей приводит к уменьшению временных затрат на изготовление прерывистых кругов и на снижение затрат на инструмент, с помощью которого осуществляется формирование впадин.

3. Установлено, что повышение шероховатости обработанной поверхности, связанное с увеличением коэффициента прерывистости, можно

компенсировать нанесением на рабочую поверхность круга твердой смазки, в состав которой входят: стеариновая кислота (60 - 65%), олеиновая кислота (20 - 25%), ацетамид (остальное). Применение твердой смазки указанного состава не только улучшает шероховатость обработанной поверхности, но и снижает температуру в зоне резания.

Список использованных источников: 1. *Худобин, Л.В.* Шлифование композиционными кругами/ *Л.В. Худобин, Н.И. Веткасов*. – Ульяновск: УлГТУ, 2004. – 256 с. **2.** *Якимов, А.А.* Повышение эффективности процесса шлифования прерывистыми кругами из синтетических сверхтвердых материалов /*А.А. Якимов, Л.В. Бовнегра, В.П. Кулик* // Проблеми техніки: Наук.-виробн. журнал. – Одеса: ОНМУ. 2015. – №2. – С.7-85. **3.** *Якимов, А.А.* Определение температуры, возникающей при зубошлифовании прерывистыми кругами на станках МААГ, 5851, 5853, работающих по нулевой схеме /*А.А. Якимов* //Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. –Харьков: НТУ «ХПИ». 2014. – Вып. 84. – С. 236-244. **4**. *Якімов, О.О.* Вплив числа ріжучих виступів на переривчастому шліфувальному крузі на параметричну стійкість пружної системи верстата і на шорсткість обробленої поверхні /*О.О. Якімов, С.М. Уміньскій, С.Ю. Дмітрієва* //Аграрний вісник Причорномор'я: сбірник наукових праць, Технічні науки. –Одеса: ОДАУ. 2014. – Вип.74. – С.139-144. **5**. *Никитин, А.В.* Шлифование труднообрабатываемых материалов импрегнированными кругами как способ повышения их режущих свойств /*А.В. Никитин* //Инструмент и технологии. – 2010. – №28. – Вып. 2 – С.52-58. **6**. *Чирков, Г.В.* Влияние импрегнирования шлифовального круга на качество обработки /*Г.В. Чирков* //Технология машиностроения. – 2007. – №2. – С.22-23. **7.** *Чирков, Г.В.* Исследование поверхностного слоя стали 45 при обработке импрегнированным инструментом /*Г.В. Чирков* //Технология машиностроения. – 2006. –№12. – С.45 -46. **8**. *Якимов, А.А.* Технологические основы обеспечения и стабилизации качества поверхностного слоя при шлифовании зубчатых колес /*А.А. Якимов*. – Одесса: Астропринт, 2003. –456 с. **9**. *Якімов, О.О.* Мастило для механічної обробки металів /*О.О. Якімов, В.І. Вінникова* /Патент 9586 Україна, С10М133/56; №93111448; Заява 31.12.92; Опубл. 26.02.99. Бюл. №1. – 4 с.

Bibliography (transliterted): 1. *Hudobin, L.V.* Shlifovanie kompozicionnymi krugami/ *L.V. Hudobin, N.I. Vetkasov*. – Ul'janovsk: UlGTU, 2004. – 256 s. **2.** *Jakimov, A.A.* Povyshenie jeffektivnosti processa shlifovanija preryvistymi krugami iz sinteticheskih sverhtverdyh materialov /*A.A. Jakimov, L.V. Bovnegra, – V.P. Kul*ik //Problemi tehniki: Nauk.-virobn. zhurnal. – Odesa: ONMU. 2015. –No 2. – S.7-85. **3.** *Jakimov, A.A.* Opredelenie temperatury, voznikajushhej pri zuboshlifovanii preryvistymi krugami na stankah MAAG, 5851, 5853, rabotajushhih po nulevoj sheme /*A.A. Jakimov* //Rezanie i instrument v tehnologicheskih sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. –Har'kov: NTU «HPI». 2014. – Vyp. 84. – S.236 – 244. **4.** *Jakimov, O.O.* Vpliv chisla rizhuchih vistupiv na pererivchastomu shlifuval'nomu kruzi na parametrichnu stijkist' pruzhnoї sistemi verstata i na shorstkist' oboblenoї poverhni /*O.O. Jakimov, S.M. Umins'kij, S.Ju. Dmitrićva* //Agrarnij visnik Prichornomor'ja: sbirnik naukovih prac', Tehnichni nauki. –Odesa: ODAU. 2014. – Vip.74. – S.139 -144. **5.** *Nikitin, A.V.* Shlifovanie trudnoobrabatyvaemyh materialov impregnirovannymi krugami kak sposob povyshenija ih rezhushhih svojstv /A.V. Nikitin //Instrument i tehnologii. – 2010. –№28. – Vyp.2 – S.52-58. **6.** Chirkov, G.V. Vlijanie impregnirovanija shlifoval'nogo kruga na kachestvo obrabotki /G.V. Chirkov //Tehnologija mashinostroenija. – 2007. –№2. – S.22 -23. **7.** *Chirkov, G.V.* Issledovanie poverhnostnogo sloja stali 45 pri obrabotke impregnirovannym instrumentom /G.V. Chirkov //Tehnologija mashinostroenija. – 2006. –№12. – S.45-46. **8.** *Jakimov, A.A.* Tehnologicheskie osnovy obespechenija i stabilizacii kachestva poverhnostnogo sloja pri shlifovanii zubchatyh koles /*A.A. Jakimov*. – Odessa: Astroprint, 2003. – 456 s. **9.** *Jakimov, O.O.* Mastilo dlja mehanichnoї obrobki metaliv /*O.O. Jakimov, V.I. Vinnikova* /Patent 9586 Ukraïna, S10M133/56; №93111448; Zajava 31.12.92; Opubl. 26.02.99. Bjul. №1. – 4 s.

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.338.27:53

В.С. АНТОНЮК, д-р техн. наук, Київ,
І.В. ЯЦЕНКО, канд. техн. наук, ***О.В. КИРИЧЕНКО***, д-р техн. наук,
В.А. ВАЩЕНКО, д-р техн. наук, Черкаси, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ З ОПТИЧНИХ КЕРАМІК ФІНІШНОЮ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЮ ОБРОБКОЮ

Представлено результати експериментальних досліджень з покращення властивостей поверхневих шарів елементів з оптичних керамік (КО1, КО2, КО3, КО5, КО12) після їх обробки рухомим електронним променем з густиною теплової дії $F_n = 10^6…1{,}6\cdot10^7$ Вт/м^2 та швидкістю переміщення $V = 10^{-3}…10^{-1}$ м/с (збільшення мікротвердості поверхні з 1,2…2,9 ГПа (необроблені елементи) до 5,7…6,4 ГПа (оброблені елементи), виникнення зміцнених шарів товщиною 210…230 мкм). Встановлено, що покращення вказаних властивостей призводить до підвищення стійкості елементів до зовнішніх термовпливів: збільшенню у 1,3…1,7 разу критичних значень зовнішніх теплових потоків та часів їх дії, перевищення яких призводить до руйнування елементів та виходу з ладу приладів для досліджуваного діапазону зміни зовнішнього тиску $10^5…10^7$ Па; підвищенню гранично допустимих значень термопружних напружень в елементах з 50…140 МПа до 160…370 МПа при температурах нагріву 300…1200 К.
Ключові слова: оптична кераміка, поверхневий шар, електроно-променева обробка, зовнішній тепловий потік, термоапруження

Представлены результаты экспериментальных исследований по улучшению свойств поверхностных слоев элементов из оптических керамик (КО1, КО2, КО3, КО5, КО12) после их обработки подвижным электронным лучом с плотностью теплового воздействия $Fn = 10^6...1{,}6\ 10^7$ Вт/м^2 и скоростью перемещения $V = 10^{-3}...10^{-1}$ м/с (увеличение микротвердости поверхности с 1,2 ... 2,9 ГПа (необработанные элементы) до 5,7 ... 6,4 ГПа (обработанные элементы), возникновение упрочненных слоев толщиной 210...230 мкм). Установлено, что улучшение указанных свойств приводит к повышению устойчивости элементов к внешним термовоздействиям: увеличению в 1,3...1,7 раза критических значений внешних тепловых потоков и времен их действия, превышение которых приводит к разрушению элементов и выхода из строя приборов для исследуемого диапазона изменения внешнего давления $10^5...10^7$ Па; повышению предельно допустимых значений термоупругих напряжений в элементах с 50...140 МПа до 160...370 МПа при температурах нагрева 300...1200 К.
Ключевые слова: оптическая керамика, поверхностный слой, электронно-лучевая обработка, внешний тепловой поток, термонапряжения

Presents the results of experimental studies on improvement of surface layers properties of the elements of optical ceramics (KO1, KO2, KO3, KO5, KO12) after processing a moving electron beam with the density of the thermal effects $F_n = 10^6…1{,}6\cdot10^7$ W/m^2 and a speed of displacement $V = 10^{-3}...10^{-1}$ m/s (increase of micro-hardness of surface from 1,2…2,9 GPa (raw elements) to 5,7... 6,4 GPa (processed elements), the occurrence of a hardened layer with a thickness of 210...230 μm). The improvement of these properties leads to high resistance elements to the external thermo-influences: increase in 1,3...1,7 times the critical values of external heat flux and the times of their operation, the exceeding of which leads to the destruction of elements and malfunction of the instrument for the studied range of variation of the external pressure of $10^5...10^7$ Pa; to increase the maximum permissible values of thermo-elastic stresses in the elements with 50...140 MPa to 160...370 MPa at the temperature of heating 300...1200 K.
Keywords: optical ceramics, surface layer, resistance elements, electron beam processing, external heat flux, thermostresses

© В.С. Антонюк, І.В. Яценко, О.В. Кириченко, В.А. Ващенко, 2016

Вступ

Успіхи, досягнуті за останню чверть століття у освоєнні електронно-променевих технологій, призвели до створення різноманітної електронно-променевої апаратури промислового, наукового, медичного та військового призначення.

Сучасні прилади з елементами з оптичних керамік для вимірювання та теплового контролю об'єктів різної фізичної природи піддаються інтенсивним зовнішнім термовпливам – підвищеним температурам нагріву та значним зовнішнім тискам, ударним термовпливам тощо [1-4].

У таких умовах відбувається суттєва зміна властивостей поверхневих шарів оптичних елементів аж до їх руйнування, що призводить до суттєвого погіршення метрологічних характеристик приладів, зниження їх надійності та зменшення строку служби аж до виходу з ладу.

Експериментальні дослідження показали [5-9], що одним з технологічних засобів попередження руйнувань оптичних елементів є електронно-променеві методи фінішної обробки їх робочих поверхонь, що дозволяють значно покращувати властивості їх поверхневих шарів (мікротвердість, товщину зміцнених шарів тощо), які впливають на стійкість матеріалів до зовнішніх термовпливу.

В той же час досліджень з попередження можливих руйнувань оптичних елементів точного приладобудування в умовах їх експлуатації з врахуванням впливу зовнішніх термовпливів недостатньо. Крім цього, не встановлено оптимальні діапазони зміни параметрів електронного променю (густини теплової дії, швидкості переміщення), в межах яких спостерігається суттєве покращення властивостей поверхневих шарів елементів, підвищення їх стійкості до теплових навантажень і, в кінцевому випадку, покращення метрологічних характеристик та надійності приладів.

Тому дослідження закономірностей і розробка рекомендацій впливу попередньої електронно-променевої обробки на стадії проектування та виготовлення приладів з елементами з оптичних керамік є актуальними.

Метою роботи є підвищення стійкості елементів з оптичних керамік приладів для вимірювання та теплового контролю об'єктів різної фізичної природи шляхом фінішної електронно-променевої обробки їх поверхневих шарів.

Методики та установки проведення досліджень

Для досліджень впливу термічної дії рухомого електронного променю на елемент з оптичної кераміки використовували спеціалізоване електронно-променеве обладнання [10], що дозволило реалізувати стрічковий електронний промінь шириною $5\cdot10^{-4}\ldots5\cdot10^{-3}$ м, довжиною $6\cdot10^{-2}\ldots8\cdot10^{-2}$ м, густиною теплової дії $F_n = 5\cdot10^{6}\ldots9\cdot10^{8}$ Вт/м^2 та швидкістю переміщення $V = 5\cdot10^{-3}\ldots10^{-1}$ м/с.

Електронно-променеве обладнання створене на базі універсальної вакуумної установки УВН-74П3 . Вакуумна система складається з вакуумної камери і вакуумного поста установки УВН-74П3, паромасляного дифузійного

насосу НП-400, форвакуумного насосу АВЗ-20, вакуумметрів ВИТ-3, та ВМБ-8, датчиків вакууму (термопарного ТП-1, іонізаційного ИП-1, магнітно-блокувального М-2) розташованих у вакуумному об'ємі [8].

Загальна схема установки для електронної обробки оптичних елементів представлена на рис. 1.

В вакуумній камері установки розташовано спеціальне технологічне оснащення для електронної обробки, а саме: кварцеву інфрачервону піч попереднього нагріву та завершального охолодження, електронну гармату з оптикою Пірса для формування стрічкового електронного потоку, механізм переміщення оптичних елементів.

Роботу спеціального технологічного оснащення забезпечують зовнішні пристрої, а саме: високовольтне джерело живлення електронної гармати на базі блоку УЕЛИ-1, блок керування кварцевої печі на базі термодатчика-терморегулятора РИФ-101, а також розроблена автоматизована система керування процесом обробки [8].

Для моделювання теплових впливів на оптичні елементи з кераміки при нормальних умовах (T_0 = 293К, P = 10^5 Па) та знаходження критичних значень їх параметрів (теплового потоку q_i^* та часу його дії t^*) використовували керований ІЧ-нагрів кварцовими лампами типу КГТ-220-1000-1 з використанням термодатчиків РИФ-101 для контролю температур поверхонь елементів та теплових потоків.

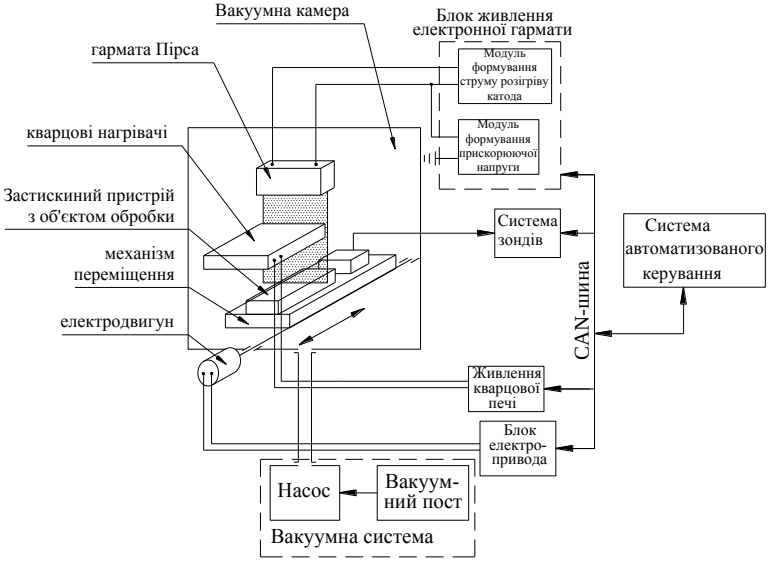


Рисунок 1 – Загальна схема електронно-променевої установки

Для дослідження поведінки оптичних елементів при підвищених температурах нагріву (до 1500 К) та зовнішніх тисках (до $3 \cdot 10^7$ Па) використовували спеціальну установку [3, 8].

Установка (рис. 2) призначена для одночасного випробування трьох елементів. Установка включає прилад постійного тиску і систему нагріву, терморегулювання і реєстрації температури. Точність підтримки робочого тиску в цій установці складає ± 5 %.

Прилад постійного тиску містить три випробувальні камери, з'єднані в один блок. Блок камер сполучений з корпусом рідинного фільтра, який перед випробуванням заповнюється водою. Термостатирування елементів проводиться безпосередньо в камерах. Всі три елементи випробуються одночасно.

При випробуванні прилад постійного тиску наддувається інертним газом. Продукти, охолоджені і очищені від конденсованих частинок в рідинному фільтрі, поступають до клапана постійного тиску, керованого стислим газом.

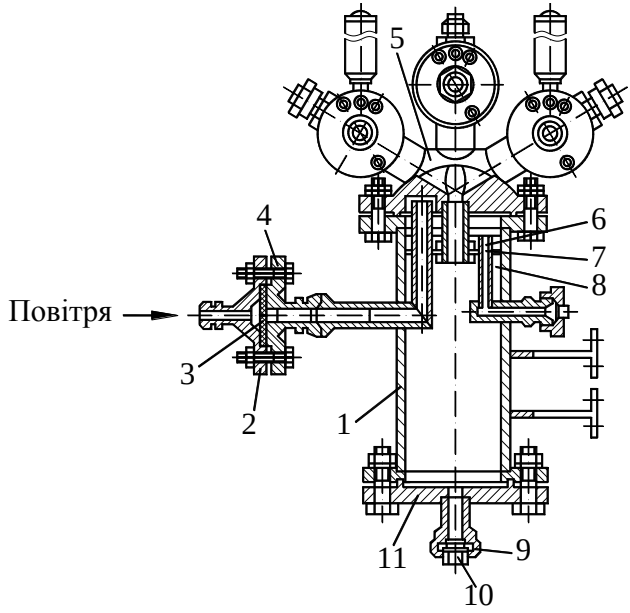


Рисунок 2 – Схема установки постійного тиску:
1 – корпус фільтра; 2 – кришка клапана; 3 – мембрана; 4 – корпус клапана;
5 – блок випробувальних камер; 6 – зливний патрубок;
7 – механічний дисковий фільтр; 8 – вода; 9 – гайка;
10 – заглушка; 11 – кришка фільтра

Випробувальна камера (рис. 3) складається з корпусу 1, сполученого патрубком з загальною кришкою блоку камер. На тій частині камери, де розташований зразок 5, встановлюється знімний електронагрівач 3. Електронагрівач складається з ніхромової спіралі, укладеної в ізоляційну кераміку. Корпус нагрівача – зварний, герметичний, виконаний з нержавіючої сталі.

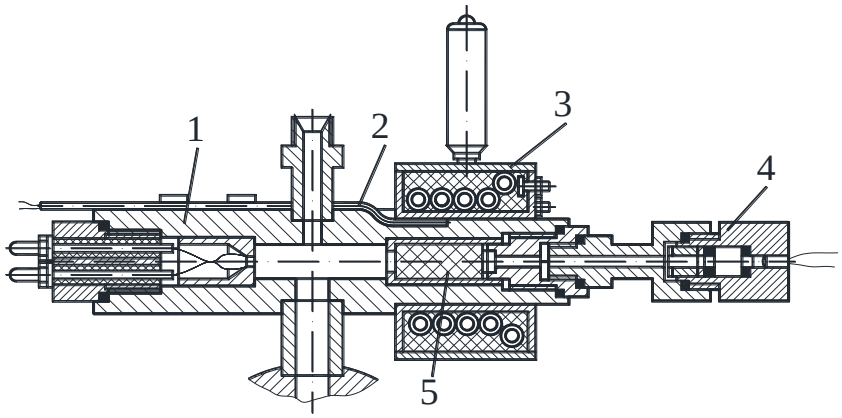


Рисунок 3 – Схема випробувальної камери установки:
1 – корпус камери; 2 – термопара; 3 – нагрівач; 4 – фотодатчик; 5 – зразок елемента

Внутрішній простір між корпусом і спіраллю заповнений азбестовим набиванням. До нагрівального елемента підводиться змінна напруга 100...200 В. Задня кришка камери має різьблення, в яке встановлено фотодатчик для реєстрації моменту закінчення нагріву зразка через отвір в донному бронюванні.

Для визначення властивостей поверхневих шарів оптичних елементів до та після електронно-променевої обробки (мікротвердості поверхні (H_v, МПа), величин залишкових термонапружень (σ, МПа) та товщин зміцнених шарів (Δ, мкм) використовували методи фізико-хімічного аналізу (мікроідентування за методом Вікерса, методи оптичної мікроскопії та мікрозондового аналізу, які включають растрову та скануючу мікроскопію та трансмісійну електронну мікроскопію, дифрактометри загального призначення ДРОН-3,0 з спеціальними приставками для вимірювання мікронапружень у поверхневих шарах тощо [11]. Межа міцності оптичних елементів $\sigma^*(T)$ до та після електронно-променевої обробки знаходили методом центрально-кільцевого згину [12].

Результати досліджень та їх аналіз

Для дослідження впливу параметрів електронного променю на властивості поверхневих шарів елементів з оптичної кераміки (КО1, КО2, КО3, КО5, КО12) використовували диски діаметром $3\cdot10^{-2}…5\cdot10^{-2}$ м та товщиною $4\cdot10^{-3}…6\cdot10^{-3}$ м, півсферичні обтічники діаметром $4\cdot10^{-2}…8\cdot10^{-2}$ м (рис. 4).

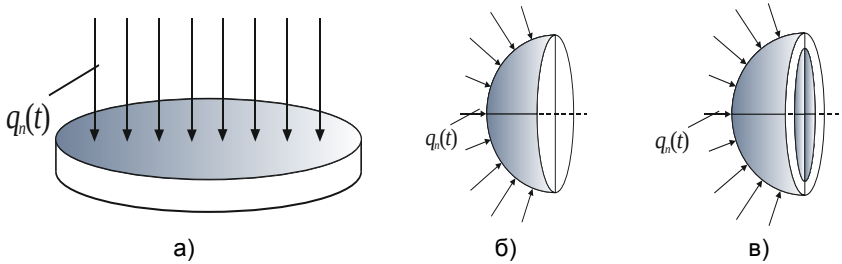


Рисунок 4 – Загальний вигляд оптичних елементів:
а) диски; б), в) – півсферичні обтічники;
$q_n(t)$ – густина зовнішньої теплової дії, Вт/м^2

Проведені експерименти з електронної обробки елементів з оптичних керамік показали, що вони не можуть бути оплавлені у вакуумі внаслідок високої пружності парів [7, 8].

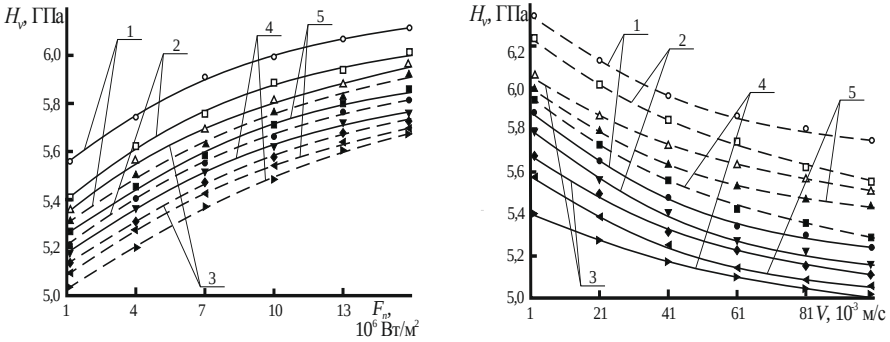
Так, попередній нагрів у вакуумі оптичних елементів навіть до 1300 К, призводить до інтенсивного випаровування матеріалу, а при намаганні його оплавлення рідка фаза практично не утворюється.

При цьому електронна обробка елементів з оптичної кераміки без попереднього нагріву призводить до підвищення їхньої мікротвердості, впорядкування структури та зміцнення за рахунок формування у поверхневих шарах стискаючих напружень і тим самим до підвищення міцності виробів на ударні теплові впливи, яким вони піддаються в умовах експлуатації.

Електронно-мікроскопічний аналіз знімків поверхонь та поперечних шліфів оптичної кераміки до та після електронної обробки показує, що відбувається помітна зміна структури по глибині матеріалу (до 250...300 мкм), яка найбільш суттєво залежить від параметрів електронного променю (F_n, V). При цьому помітним є грубий рельєф (деформованого походження) з елементами ″в'язкого″ руйнування, що свідчить про здатність матеріалу чинити опір руйнуванню при навантаженні.

В результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що для розглядуваних діапазонів зміни параметрів електронного променю ($F_n = 10^6…1{,}6\cdot10^7$ Вт/м^2, $V = 10^{-3}…10^{-1}$ м/с) мікротвердість поверхні елементів змінюється від 1,2…2,9 ГПа (для необроблених елементів) до 5,7…6,4 ГПа (для оброблених елементів).

При цьому збільшення F_n від 10^6 Вт/м^2 до $1{,}6\cdot10^7$ Вт/м^2 призводить до збільшення мікротвердості поверхні кераміки у 1,5…1,7 разу, а збільшення V від 10^{-3} до 10^{-1} м/с призводить до зменшення мікротвердості поверхні кераміки у 1,3…1,4 разу (рис. 5 а, б).



а) б)

Рисунок 5 – Залежність мікротвердості поверхні елементів
з оптичних керамік КО12 (1), КО2 (2), КО1 (3), КО5 (4) та КО3 (5),
які оброблені електронним променем:
а) від його густини теплового впливу для швидкостей:
$V = 7\cdot10^{-3}$ м/с (——) і $V = 1{,}5\cdot10^{-2}$ м/с (– – –);
б) від швидкості переміщення для густини теплового впливу:
$F_n = 2{,}3\cdot10^6$ Вт/м^2 (———) і $F_n = 1{,}4\cdot10^7$ Вт/м^2 (– – –);
Δ, ○, □, ▲, ■, ♦, ▼, ●, ►, ◄– експериментальні дані

Результати досліджень зміни мікротвердості по глибині елементів з оптичних керамік, оброблених електронним променем, представлені на рис. 6 а, б. З цих даних випливає, що мікротвердість матеріалу усіх типів розглядуваних керамік достатньо швидко зменшується, прямуючи до свого значення для необроблюваного матеріалу.

При цьому товщина зміцненого шару (Δ), де виникають основні структурні зміни та підвищується мікротвердість оброблюваного матеріалу для розглядуваних параметрів електронного променю змінюється в діапазоні від 70...90 мкм до 210...230 мкм при товщинах оброблюваних виробів $4...6\cdot10^{-3}$ м.

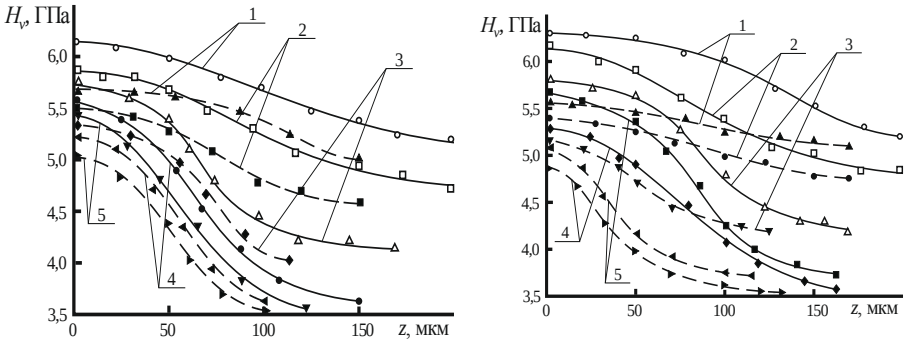


Рисунок 6 – Залежність мікротвердості по глибині елементів
з оптичних керамік КО12 (1), КО2 (2), КО1 (3), КО3 (4) та КО5 (5),
які оброблені електронним променем:
а) для швидкостей переміщення: $V = 7 \cdot 10^{-3}$ м/с (——) і $V = 1{,}5 \cdot 10^{-2}$ м/с (– – –),
при $F_n = 1{,}5 \cdot 10^7$ Вт/м^2 та
б) для значень густини теплового впливу:
$F_n = 1{,}5 \cdot 10^7$ Вт/м^2 (——) і $F_n = 5 \cdot 10^6$ Вт/м^2 (– – –);
при $V = 7 \cdot 10^{-3}$ м/с;
Δ, ○, □, ▲, ■, ♦, ▼, ●, ►, ◄ – експериментальні дані

Величина Δ суттєво залежить як від природи кераміки, так й від параметрів електронного променю (рис. 7 а, б): збільшення F_n від 10^6 Вт/м^2 до $2 \cdot 10^7$ Вт/м^2 призводить до збільшення товщини зміцненого шару у 1,8...2,6 разу, а збільшення швидкості руху променю від $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ м/с до $2 \cdot 10^{-2}$ м/с призводить до зменшення товщини зміцненого шару у 1,7...2,5 разу.

Встановлено, що вплив електронного променю на поверхню елементів з оптичної кераміки призводить до збільшення блоків мозаїки та зменшення мікродеформацій кристалічної ґратки: величина блоків мозаїки від вихідного до обробленого електронним променем оптичних елементів збільшується у 3,9 разу для елементів з КО1, у 5,5 разу для елементів з КО2, у 3,3 разу для елементів з КО12, у 4,7 разу для елементів з КО3 та у 7,7 разу для елементів з КО5, а величина мікродеформацій зменшується у 3,7 разу для елементів з КО1, у 5,4 разу для елементів з КО2, у 4,2 разу для елементів з КО12, у 5,5 разу для елементів з КО3 та у 5,9 разу для елементів з КО5.

Встановлено, що незалежно від технологічних режимів обробки (значень F_n та V для розглядуваних діапазонів їхньої зміни) елементів з оптичних

керамік у всіх випадках спостерігається збільшення розмірів блоків мозаїки та зменшення мікродеформацій їхніх кристалічних ґраток, тобто в результаті електронної обробки отримуються більш крупнозернисті поверхневі шари з напруженнями у кристалічних ґратках.

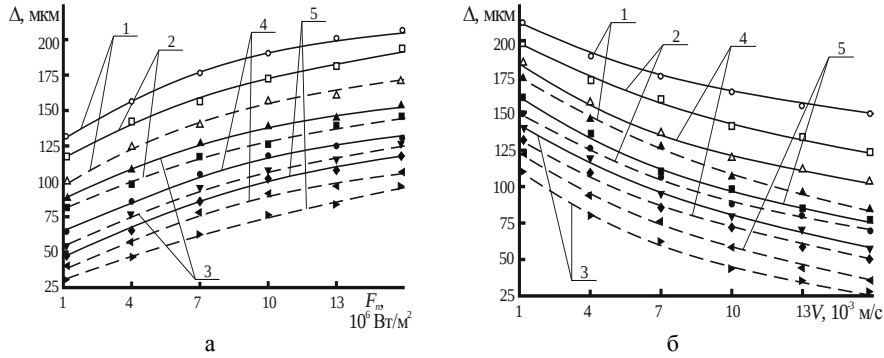


Рисунок 7 – Залежність глибини зміцнення електронним променем шарів елементів з оптичних керамік КО12 (1), КО2 (2), КО1 (3), КО3 (4) та КО5 (5):
а) від значень його густини теплового впливу:
$V = 7 \cdot 10^{-3}$ м/с (———) і $V = 1{,}5 \cdot 10^{-2}$ м/с (– – –);
б) від швидкості його переміщення: $F_n = 1{,}6 \cdot 10^7$ Вт/м^2 (———); $F_n = 2 \cdot 10^6$ Вт/м^2 (– – –);
Δ, ○, □, ▲, ■, ♦, ▼, ●, ►, ◄ – експериментальні дані

Аналіз отриманих змін параметрів кристалічних ґраток елементів після електронної обробки у відповідності з відомими методами розрахунку даних рентгенограм [11], що базуються на прямій аналітичній залежності між залишковими напруженням, які діють по поверхні елемента та зміною періоду кристалічної ґратки основних компонентів розглядуваних керамік, показав наявність стискаючих напружень у тонких поверхневих шарах елементів глибиною 40...60 мкм для центральної частини оброблених ділянок (розмір ділянок $4 \cdot 10^{-2}$...$5 \cdot 10^{-2}$ м) у розглядуваних діапазонах зміни параметрів електронного променю: для елементів з оптичної кераміки КО1 – до 30…40 МПа; для елементів з оптичної кераміки КО2 – до 60…70 МПа; з оптичної кераміки КО3 – до 25…30 МПа; з оптичної кераміки КО5 – до 55…65 МПа; з оптичної кераміки КО12 – до 75…90 МПа.

В результаті проведених досліджень встановлено, що після попередньої електронно-променевої обробки оптичних елементів (товщина елемента $H = 4 \cdot 10^{-3}$ м, $T_0 = 300$ К, $P = 10^5$ Па) відбувається збільшення критичних значень зовнішніх теплових потоків q_n^* та часів їх дії t^* у 2…4 рази (рис. 8 а, б).

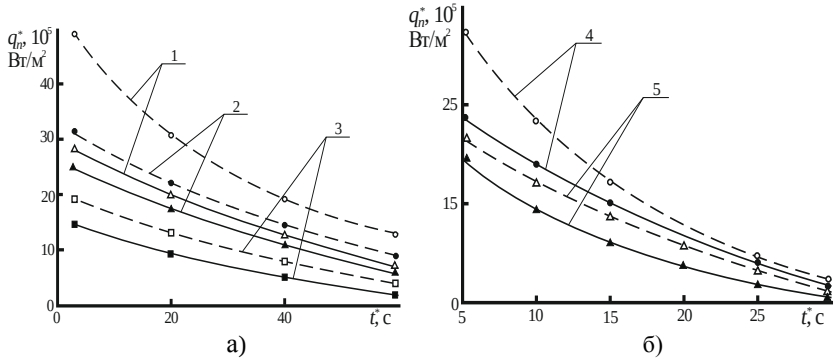


Рисунок 8 – Залежності критичних значень зовнішніх теплових потоків q_n^* від часу їх дії t^* на оброблені (– – –) та необроблені (———) електронним променем оптичні елементи при $F_n = 1{,}6 \cdot 10^7$ Вт/м^2 і $V = 10^{-3}$ м/с);
а) – елементи з оптичних керамік КО5 (1), КО1 (2) та КО12 (3) та
б) –з оптичних керамік КО3 (4) та КО2 (5);
Δ, ○, □, ▲, ■, ● – експериментальні дані

При цьому збільшення зовнішнього тиску до 10^7 Па, які можуть реалізовуватися, наприклад, у фронті ударної хвилі при надзвуковому обдуві потоком повітря обтічників ІЧ-приладів в умовах пострілу та польоту [7, 8], призводить до збільшення значень q_n^* та t^* тільки у 1,3…1,7 разу. На рисунках 8 а, б представлені критичні значення зовнішніх теплових потоків q_n^* від часу їх впливу t^* на оброблені електронним променем оптичні елементи товщиною $H = 6 \cdot 10^{-3}$ м, при тепловому потоці $F_n = 1{,}6 \cdot 10^7$ Вт/м^2 та швидкості його переміщення, $V = 10^{-3}$ м/с.

Крім цього, встановлено, що гранично допустимі значення термопружних напружень σ^* при різних температурах нагріву T для оптичних елементів товщиною $H = 4 \cdot 10^{-3}$ м при тепловому потоці $F_n = 1{,}6 \cdot 10^7$ Вт/м^2 та швидкості його переміщення $V = 10^{-3}$ м/с, оброблених електронним променем, у 1,8…2,7 разу вище, ніж для необроблених елементів (рис. 10).

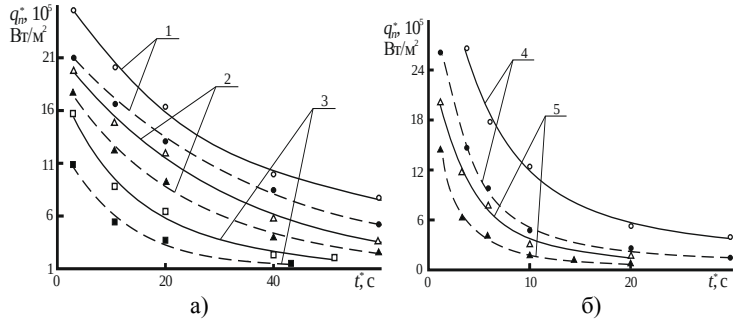


Рисунок 9 – Залежності критичних значень зовнішніх теплових потоків q_n^* від часу їх дії t^* на оброблені електронним променем оптичні елементи при $P = 10^5$ Па (——); $P = 10^7$ Па (– – –);
а) – елементи з оптичних керамік КО5 (1), КО1 (2) та КО12 (3);
б) – елементи з оптичних керамік КО2 (4) та КО3 (5);
Δ, ○, □, ▲, ■, ● – експериментальні дані

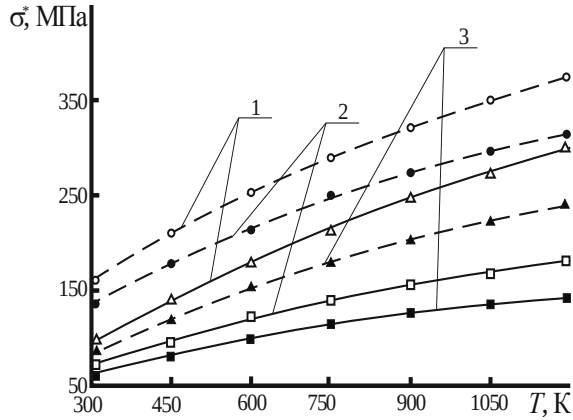


Рисунок 10 – Залежність величини гранично допустимих термопружних напружень в елементах з оптичних керамік КО1 (1), КО2 (2), КО3 (3) від температури нагріву ($P = 10^5$ Па, не оброблених (——) електронним променем і оброблених (– – –)); Δ, ○, □, ▲, ■, ● – експериментальні дані

В результаті проведених експериментальних досліджень встановлено,

що після попередньої обробки робочих поверхонь елементів з оптичних керамік (КО1, КО2, КО3, КО5, КО12) рухомим електронним променем для діапазонів зміни його параметрів (густини теплового впливу $F_n = 10^6 \ldots 1{,}6 \cdot 10^7$ Вт/м^2 та швидкості його переміщення $V = 10^{-3} \ldots 10^{-1}$ м/с) покращуються основні властивості їх поверхневих шарів:

– підвищується мікротвердість поверхні у 1,5…1,7 разу;

– у поверхневих шарах товщиною 40…60 мкм виникають стискаючі термопружні напруження величиною 25…90 МПа, які призводять до утворення зміцнених шарів товщиною до 210…230 мкм.

Отримано, що покращення властивостей поверхневих шарів оптичних елементів після їх електронно-променевої обробки призводить до підвищення стійкості елементів до зовнішніх термовпливів:

– збільшуються у 2…4 рази критичні значення зовнішніх теплових потоків та часів їх дії, які призводять до руйнування елементів; при цьому збільшення зовнішнього тиску від 10^5 Па до 10^7 Па знижує вказані критичні значення параметрів у 1,3…1,7 разу;

– підвищуються у 1,8…2,7 разу значення гранично допустимих термопружних напружень у оптичних елементах, оброблених електронним променем, для діапазонів зміни температур нагріву 300…1200 К.

Висновки

Отримані результати рекомендується використати при проектуванні та виготовленні нових приладів, а також модернізації серійних приладів з оптичними елементами для вимірювання та теплового контролю об’єктів різної фізичної природи (світлофільтрів ІЧ-приладів, лазерних прицільних комплексів, лазерних медичних приладів на основі оптичних світловодів тощо), що дозволить покращити їх основні метрологічні характеристики (точність, діапазон вимірювання, чутливість тощо), а також підвищити вірогідність, надійність, ресурс та строк служби при їх експлуатації з врахуванням впливу зовнішніх термовпливів, а також при застосуванні виробів з ІЧ-приладами самонаведення та спостереження в умовах вистрілу та польоту при значних зовнішних ударних, теплових і механічних впливах.

Список використаних джерел: **1.***Ващенко В.А., Канашевич Г.В., Лукашенко В.М., Бондаренко М.А., Яценко И.В.* ОптоЕлектроника и микрооптика – перспективные отрасли науки и техники // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2002. – № 2. – С.52-62. **2.** *Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г.* Инфракрасные системы “смотрящего” типа. – М.: Логос, 2004. – 444 с. **3.** *Ващенко В.А., Котельников Д.И., Лега Ю.Г., Краснов Д.М., Яценко И. В., Кириченко О.В.* Тепловые процессы при электронной обработке оптических материалов и эксплуатации изделий на их основе. – К.: Наукова думка, 2006. – 368 с. **4.** *Бонусь М.Н., Гладкова А.И., Горбатюк С.А. и др.* Современные аспекты лазерной терапии. – Черкассы: Вертикаль, 2011. – 608 с. **5.** *Дудко Г.В., Кулов С.К., Розе Ю.А., Максимова Н.Г.* Исследование электронно-лучевых процессов в создании базовых технологий ЕЛЕФП // Электронная промышленность. – 1991. – Вып. 1. – С. 41-45. **6.** *Канашевич Г.В., Ващенко В.А., Бондаренко М. О.* Перспективи використання електронного променю в технології інтегральної

оптики // Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту. – 2000. – № 2. – С. 189-193. **7.** *Яценко И.В.* Теплофизические процессы электронной обработки изделий точного приборостроения // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2004. – № 4. – С. 97-103. **8.** *Ващенко В.А., Яценко І.В.,. Лега Ю.Г,. Кириченко О.В.* Основи електронної обробки виробів з оптичних матеріалів. Монографія. – К.: Наукова думка, 2011. – 562 с. **9.** *Yatsenko I., Antoyuk V., Bondarenko M., Vashchenko V.* Influence of parameters by electronic ray on properties of superficial layers of optical elements of exact instrument-making // International journal for science and innovations for the industry "Innovations in discrete productions", YEAR III, ISSUE 1/2015, Sofia. – P. 13-15. ***10.*** *Патент України на корисну модель № 4177C03B29/00, H01J37/305.* Пристрій для електронно-променевого полірування виробів / *Яценко І.В., Канашевич Г.В., Коваленко Ю.І. та ін.* – Бюл. № 1/2005. **11.** *Дубровська Г.М., Канашевич Г.В., Божко Н.І.* Прилади застосування фізичних методів дослідження структури поверхні. – Сільхет: Шобуж Біпоні, Удоун Офсет Принтерс, 2007. – 248 с. **12.** *Окатов М.А., Антонов Е.А., Байгожин А.Б.* Справочник оптика-технолога. – СПб.: Политехника, 2004. – 679 с.

Bibliography (transliterted): 1.*Vashchenko V. A., Kanashevych H. V., Lukashenko V. M., Bondarenko M. A., Yatsenko Y. V.* OptoElektronyka y mykrooptyka – perspektyvnыe otrasly nauky y tekhnyky // Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. – 2002. – № 2. – S. 52–62. **2.** *Tarasov V. V., Yakushenkov* Iu. H. Ynfrakrasnыe systemы "smotriashcheho" typa. – M.: Lohos, 2004. – 444 s. **3.** *Vashchenko V. A., Kotelnykov D. Y., Leha Iu. H., Krasnov D. M., Yatsenko Y. V., Kyrychenko O. V.* Teplovыe protsessы pry Elektronnoi obrabotke optycheskykh materyalov y Ekspluatatsyy yzdelyi na ykh osnove. – K.: Naukova dumka, 2006. – 368 s. **4.** *Bonus M. N., Hladkova A. Y., Horbatiuk S. A.* y dr. Sovremennыe aspekty lazernoi terapyy. – Cherkassы: Vertykal, 2011. – 608 s. **5.** *Dudko H. V., Kulov S. K., Roze Iu. A., Maksymova N. H.* Yssledovanye Elektronno-luchevыkh protsessov v sozdanyy bazovыkh tekhnolohyi ELEFP // Elektronnaia promыshlennost. – 1991. – Vyp. 1. – S. 41-45. **6.** *Kanashevych H. V., Vashchenko V. A., Bondarenko M. O*. Perspektyvy vykorystannia elektronnoho promeniu v tekhnolohii intehralnoi optyky // Visnyk Cherkaskoho inzhenerno-tekhnolohichnoho instytutu. – 2000. – № 2. – S. 189-193. **7.** Yatsenko Y.V. Teplofyzycheskye protsessы Elektronnoi obrabotky yzdelyi tochnoho pryborostroenyia // Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. – 2004. – № 4. – S. 97-103. **8.** *Vashchenko V. A., Yatsenko I. V.,. Leha Iu. H,. Kyrychenko O. V.* Osnovy elektronnoi obrobky vyrobiv z optychnykh materialiv. Monohrafiia. – K.: Naukova dumka, 2011. – 562 s. **9.** *Yatsenko I., Antoyuk V., Bondarenko M., Vashchenko V*. Influence of parameters by electronic ray on properties of superficial layers of optical elements of exact instrument-making // International journal for science and innovations for the industry "Innovations in discrete productions", YEAR III, ISSUE 1/2015, Sofia. – P. 13-15. **10.** Patent Ukrainy na korysnu model № 4177S03V29/00, N01J37/305. Prystrii dlia elektronno-promenevoho poliruvannia vyrobiv / Yatsenko I. *V., Kanashevych H. V., Kovalenko Iu*. I. ta in. – Biul. № 1/2005. **11.** *Dubrovska H. M., Kanashevych H. V., Bozhko N. I.* Prylady zastosuvannia fizychnykh metodiv doslidzhennia struktury poverkhni. – Silkhet: Shobuzh Biponi, Udoun Ofset Prynters, 2007. – 248 s. **12.** *Okatov M. A., Antonov E. A., Baihozhyn A. B*. Spravochnyk optyka-tekhnoloha. – SPb.: Polytekhnyka, 2004. – 679 s.

УДК 617

Я.Н. ГАРАЩЕНКО, канд. техн. наук,
Г.К. КРЫЖНЫЙ, канд. техн. наук,
А.И. ПОПОВ, канд. мед. наук, ***Е.Г. БЕЛЫЙ,*** Харьков, Украина

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ИМПЛАНТАТА ПОЗВОНКА ГРУДНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА С ПРИМЕНЕНИЕМ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОГО КОМПОЗИТА

В статті приведено результати аналізу будови хребців грудного відділу хребта людини та можливості CAD-систем для їх математичного моделювання. На основі отриманої моделі розроблено конструкцію імплантату хребця із застосуванням вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу.
Ключові слова: моделювання хребта людини, імплант, вуглець-вуглецеві композити, транспедикулярний гвинт

В статье представлены результаты анализа строения позвонков грудного отдела позвоночника человека и возможности CAD-систем для их математического моделирования. На основе полученной модели разработана конструкция имплантата позвонка с применением углерод-углеродного композиционного материала.
Ключевые слова: моделирование позвоночного столба, имплантат, углерод-углеродные композиты, транспедикулярный винт

The results of the analysis of structure of vertebrae of human spine and possibilities of CAD systems for mathematical modeling are presented in the research. On the basis of the model developed the design of the vertebrae implant using carbon-carbon composite material.
Keywords: modeling of spinal column, implant, carbon-carbon composites, transpedicular screw

Постановка проблемы. В настоящее время все чаще изношенные или разрушенные элементы костной системы человека заменяются их искусственными аналогами – имплантатами. Они изготавливаются обычно из металла – нержавеющей стали или титана. В процессе жизни человека имплантат становится частью его тела. Находясь в окружении мышечной ткани, фактически в электролитической среде, металлы подвергаются коррозии. Сочетание металлов в паре скольжения, опасно для организма продуктами коррозии. Кроме того они имеют большой удельный вес и, главное, организм не воспринимает их своей органической составной частью.

Анализ последних исследований и публикаций

В работе [1] отмечается, что системная реакция организма на чужеродное тело противодействует вживлению протеза, приводит к послеоперационным осложнениям. Большинство осложнений относятся к ятрогенным. Осложнения, вызванные самими протезами, в том числе функциональный или механический отказ, отторжение протеза, происходят из-за противоречивости, несогласованности взаимосвязанных свойств

© Я.Н. Гаращенко, Г.К. Крыжный, А.И.Попов, Е.Г. Белый,2016

конструкции протеза и живых тканей позвоночного сегмента. Восстановить целостность биосистемы позвоночного сегмента протезом межпозвонкового диска, не обладающим свойствами живых тканей, невозможно. Конструкция протеза негативно влияет на живые ткани, которые, в свою очередь, системно противодействуют вживлению, неблагоприятно воздействуют на конструкцию. Конструкционные материалы небезопасны для организма, химический состав, структура и свойства конструкционных материалов неблагоприятно изменяются при длительном контакте с биологическими тканями и жидкостями.

В настоящее время в восстановительной хирургии используются многочисленные металлические, керамические и полимерные материалы. Известно, что сочетание металлических медицинских изделий в имплантатах осложняет работу эндопротеза из-за гальвано-электрических явлений вследствие различных электрохимических потенциалов, приводящих к металлозу окружающих биологических тканей или к коррозии деталей. Кроме того, металлам свойственно вызывать резорбцию костной ткани, а усталостные явления часто приводят к разрушению эндопротеза. Керамические материалы очень износоустойчивы, но, к сожалению, очень дороги. Хрупкость керамики ограничивает сферу ее применения и вызывает резорбцию кости при прямом контакте [1]. Полимерные материалы нередко вызывают злокачественные перерождения окружающих тканей, проявляют хладотекучесть, старение, что неблагоприятно сказывается на имплантате [2].

Для устранения данных проблем ведутся разработки в направлении использования углепластика [3]. В составе углепластика применяемого для устранения дефектов кости содержится углеродный материал и полиамидная пленка. Дополнительно включают в состав порошок титана и кремния для повышения рентгеноконтрастности и биосовместимости.

В последнее время для устранения указанных недостатков стали применять углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ), в которых и матрица, и наполнитель из углерода. В качестве наполнителя применяют углеродные волокна, ленты и ткани. Углеродные матрицы выполняют из кокса пеков, синтетических смол, пироуглерода.

Первые стадии производства углерод-углеродного композита аналогичны изготовлению композита с полимерной матрицей. Углеродные волокна пропитывают фенолформальдегидной смолой, т.е. термореактивной смолой. Затем соответствующим образом собранные и пропитанные смолой волокна нагревают в инертной атмосфере. При этом происходит пиролиз смолы (обугливание, аналогичное процессу превращения дерева в древесный уголь) и остается углерод. Полученный композит снова под давлением пропитывают смолой и подвергают пиролизу. В результате многократного повторения процесса образуется прочный материал с минимальным числом внутренних пустот.

Наиболее перспективным видом армирования углерод-углеродных композитов конструкционного назначения является многонаправленное, пространственное армирование, когда армирующие компоненты располагаются в трех, четырех и более направлениях.

На основе углеродных волокон делают самый теплостойкий углерод-углеродный композит (УУК), в котором матрицей, склеивающей углеродные волокна, служит практически чистый углерод.

Каждый материал имеет свои области преимущественного использования. УУК широко применяется в медицине для изготовления армирующих пластинок для соединения костей при переломах, изготовления сердечных клапанов, имплантации зубов. Эти материалы характеризуются биосовместимостью с тканями человека, прочностью, гибкостью, легкостью. Они отлично приживаются, не давая нежелательных реакций. Например, стержни тазобедренных суставов из УУК, разработанные в Германии, обладают высокой усталостной прочностью и заданной деформацией. Французская фирма CEM выпускает композиты сложного состава УУК+керамша (био-карб), сочетающие биологические свойства углерода, биомеханические и трибологические свойства керамики для изготовления зубных протезов.

Нерешенными остаются проблемы применения УУК для элементов позвоночника. Использование углерод-углеродного композита в качестве основного материала для имплантата позвонка грудного отдела человека, благодаря указанным выше его свойствам открывает новые возможности в ортопедии. Однако ортопедия выдвигает свои основные требования – простота и надежность. А новый материал наряду с положительными свойствами несет и проблемы – ему противопоказаны резьбовые элементы и сложность технологической обработки. Это усложняет конструирование и изготовление протеза. К этому следует добавить также ограниченность знаний биомеханики позвоночника. Поэтому новый материал требует нового подхода к его использованию в имплантатах.

Целью данной работы является разработка имплантата для замены позвонков грудного отдела позвоночника на основе углерод-углеродного композита.

Для достижения этой цели были поставлены следующие **задачи**:

- первичное моделирование позвоночного столба, имплантата и его вспомогательных элементов;
- анализ и проверочный расчет первичной модели имплантата и его элементов в Solidthinking и Ansys, совершенствование конструкции;
- контрольный анализ и проверочный расчет усовершенствованной модели имплантата и его элементов в Ansys.

Основной материал исследований. Человеческое тело достаточно сложный механизм для расчета напряжений в костной системе. Однако

современные методы расчета напряженно-деформированного состояния позволяют достаточно точно (с относительной погрешностью не более 20%) рассчитать напряжения, возникающие в позвоночном столбе на основании тех сил, которые действуют на позвоночник.

Использование CAD/CAE-систем Powershape, Ansys, FreeCad, Solidthinking и др. является повседневной практикой, которая во многом определяет успех инженерных работ в настоящее время.

Имплантат в процессе жизни человека станет его частью тела, т.к. тело имеет способность, а именно костная ткань создавать костный шар вокруг имплантата, что увеличит со временем жесткость и прочность конструкции: "позвонок-имплантат-позвонок".

Возможность использования биосовместимого материала при ортопротезировании вызывает большой интерес на рынке.

По сравнению с традиционным материалом – титаном, углерод-углеродистый композит обладает рядом преимуществ:

- более высокая прочность;
- дешевизна материала;
- неограниченные запасы сырья для изготовления;
- полная биосовместимость;
- упрощение при проведении облучения в медицинских целях.

Недостатки:

- невозможность изготовления мелких элементов изделия (резьбы, рифлений), т.к. размер сетки волокон не может быть слишком малым (необходимое условие - не менее 0,5 мм), при уменьшении толщины детали непропорционально большее уменьшение ее прочности;
- в связи с невозможностью изготовления мелких изделий необходим расширенный поиск конструкторских решений.

Для решения проблемы, вызванной недостатками УУК было принято решение об использовании комплексной конструкции, объединяющей имплантат позвонка из УУК и крепежные изделия из титановых сплавов.

В процессе создания изделия невозможно создать чистовой вариант готовой детали сразу, поскольку, учитывая сложное геометрическое строение костной системы человека и другие факторы, это непосильная задача. В связи с этим возникает необходимость первичного моделирования, когда рассматриваются самые простые конструкции, которые не могут быть оспорены сразу, а только после исследования всех вариантов возможных нагрузок и напряженно-деформируемого состояния.

Для изучения распределения нагрузки в человеческом теле была создана модель позвоночного столба человека учитывающей все силы, которые мышцы вызывают и места приложения этих сил. Такая модель позволила определить действующие силы, возникающие при выполнении какого-нибудь

движения (напр. движение рукой) и силы, уравновешивающие нагрузку на позвоночник и имеющие направление по нормали к позвонкам.

Исследование разработанных моделей позволило учесть особенности нагрузок и создать первичный вариант имплантата с его крепежными элементами.

Разрабатываемые элементы имплантата получили окончательную форму после выполнения циклической работы с совершенствованием, доработкой конструкции и перебором возможных вариантов используемых материалов (углерод-углеродный композит и сплавы титана).

3D модели позвонков создавались по данным томограммы. Первичная триангуляционная модель получена в приложении Doctor M на основании снимков томографии позвоночника пациента (рис. 1).

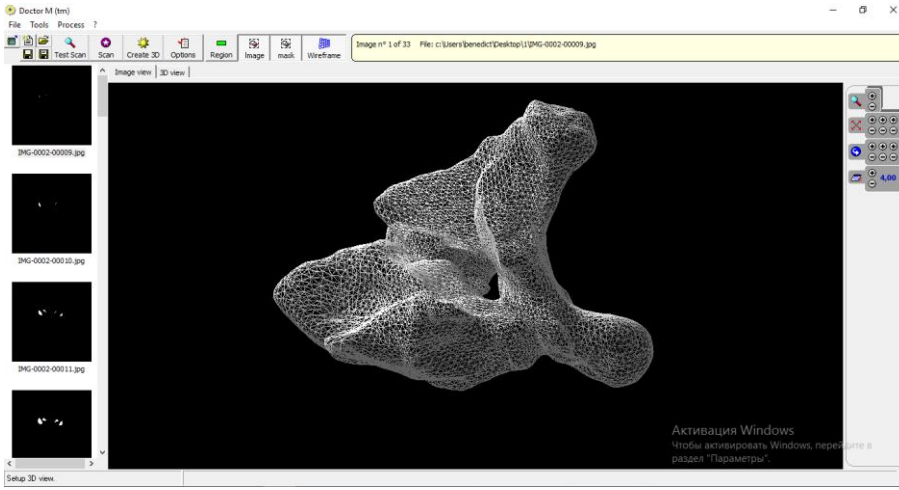


Рисунок 1 – Триангуляционная модель позвонка

Триангуляционная модель не позволяет ее использовать для расчетов напряженно-деформированного состояния, поэтому модель редактировалась в программе Magics для ее упрощения и устранения дефектов, а в CAD-системе FreeCad производилась конвертация в твердотельную модель. Такая модель имплантата сняла проблемы последующего моделирования крепежных элементов в CAD-системе PowerShape и использования в системе конечно-элементного анализа Ansys.

Полученная модель позвоночника представлена на рис. 2. Данная модель (в STL-формате) создавалась в PowerShape из моделей всех позвонков. В последующем послужила для корректировки расположения имплантатов позвонков.

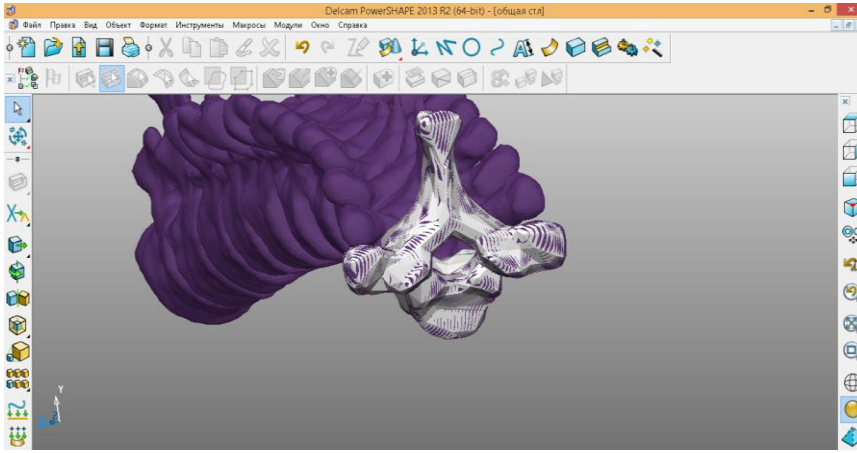


Рисунок 2 – Модель позвоночника в PowerShape

Правильное взаимное расположение позвонков обеспечивалось по исходным кадрам томографии, разнесенные на группы по принадлежности к конкретному позвонку. Такой подход позволил уйти от возможного «склеивания» контактных поверхностей.

Оптимизацию конструкции имплантата выполняли в CAD-системе SolidThinking исходя из следующих условий:

- максимальная площадь контакта с позвонками на торцах;
- обеспечение целостности контактирующей костной ткани;
- устойчивость и прочность всей конструкции;
- равномерное распределение напряжений;
- технологичность (возможность изготовления);
- возможность внедрения в тело человека;
- удобство в обращении в процессе оперативного вмешательства;
- возможность крепления в имплантате.

Максимальное сцепление имплантата с поверхностью соседних позвонков обеспечено с помощью рифлений на его торцах.

Крепление имплантата производится путем присоединения к балке (титановый стержень) посредством изогнутого титанового стержня переменного сечения, представленного на рис. 3. Балка, в свою очередь, крепится к соседним позвонкам с помощью транспедикулярных винтов (рис. 4). Соединение углеродного цилиндра и балки осуществляется с помощью титанового стержня (до изгиба – цилиндрическое, после изгиба – полигональное). Данная конструкция, как показали результаты исследования,

выдерживает максимальные нагрузки и равномерно распределяет их по всей конструкции.

Шайбы, изображенные на рис. 3, контактирующие с переходником, предлагается изготавливать из наиболее пластичного титанового сплава в конструкции, с целью создания наибольших сил трения для препятствования раскручиванию конструкции.

Использование данной конструкции позволило максимально уменьшить использование титана и частично заменить его на углерод-углеродный композит.

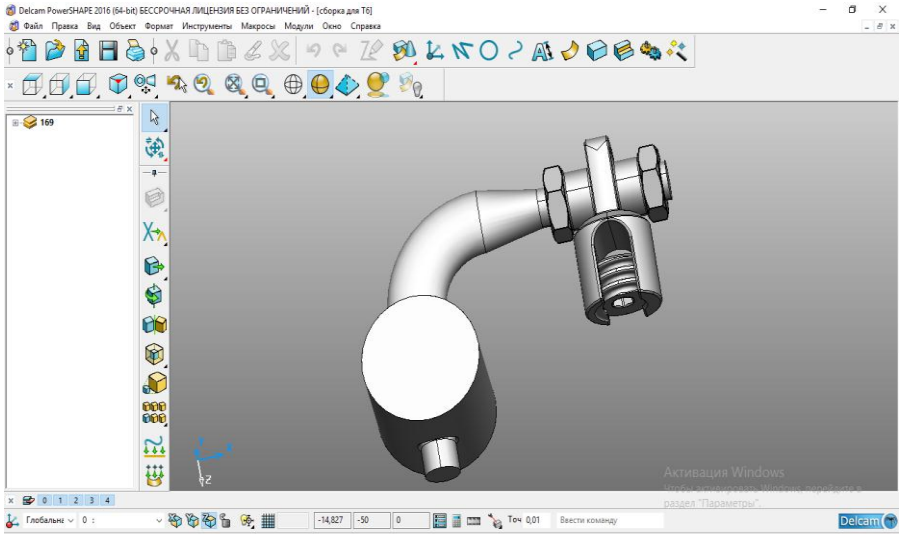


Рисунок 3 – Механизм крепления моста и крюка в сборе

Размеры винтов крепления выбирались из стандартов американских и южнокорейских производителей транспедикулярных винтов.

При ориентировании винтов были учтены все необходимые условия:

- отсутствие разрывов костной ткани;
- учет правильного наклона винта (не превышающего 15°);
- использование нужного диаметра и длины винтов и т.д.

В процессе операции балка, соединяющая винты и крепление имплантата в одну конструкцию, изгибается в определенных местах хирургом во время проведения операции, для копирования изгиба спины пациента. Поэтому для балки подбирался пластичный титановый сплав.

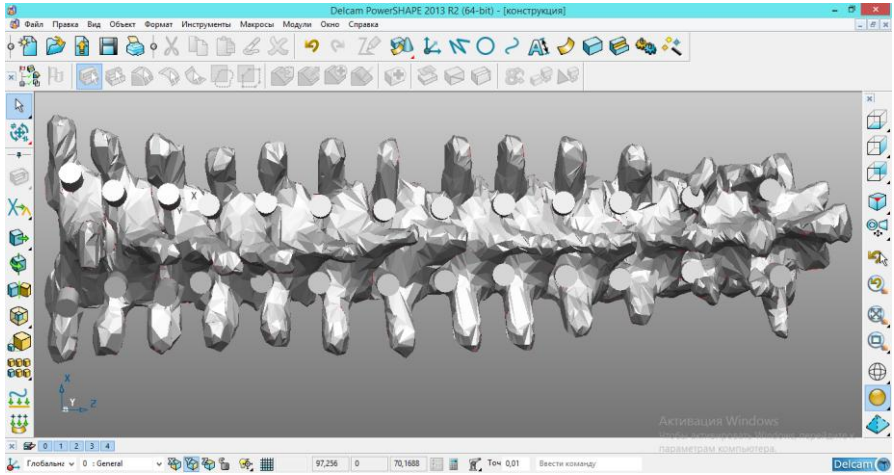


Рисунок 4 – Модель позвоночника и транспедикулярных винтов

Проверочные расчеты конструкции выполнялись в CAE-системе Ansys. Одна из полученных цветовых карт напряжений в исследуемой конструкции представлена на рис. 5. Такие расчеты позволили окончательно оптимизировать конструкцию по критерию равномерного распределения напряжений в различных ее сечениях.

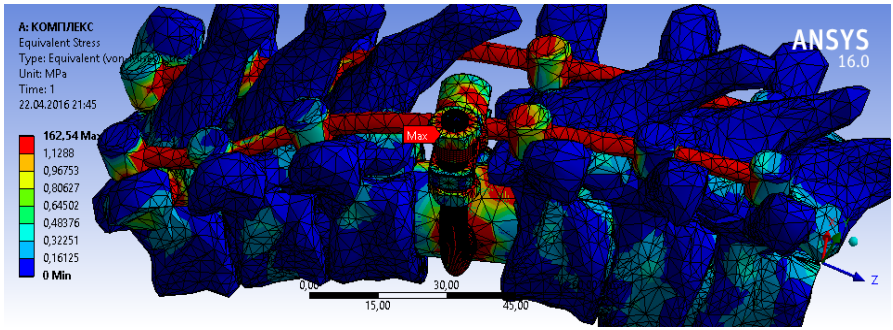


Рисунок 5 – Проверочный расчет распределения напряжений в конструкции

Выводы по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития в данном направлении. В результате выполненной работы спроектирован имплантат для замены позвонков грудного отдела позвоночника, с использованием в качестве основного материала углерод-углеродного композита (УУК), а также вспомогательных элементов из сплава титана.

Полученные результаты проверочных расчетов в CAE-системе подтверждают возможность использования имплантатов из УКК. В данной работе показан пример проектирования имплантата из указанного материала, а также конструкторское решение, позволяющее решить вопрос фиксации имплантата в позвоночнике, способствующее упрощению проведения операции.

Основные трудности с использованием УУК были преодолены за счет конструкторских решений, подкрепленных проверочными расчетами. Данное исследование показывает перспективу использования УУК в проведении операции по замене позвонков грудного отдела позвоночника человека.

Однако перспективы дальнейшего совершенствования конструкции имплантата далеко не исчерпаны и требуют последующих исследований и испытаний.

Список використаних джерел: **1.** *Фандеев В.П., Самохина К.С.* Конструирование протезов межпозвонковых дисков // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6.; URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=16338 (дата обращения: 19.02.2016). **2.** *П.И. Золкин, Г.М. Кавалерский*. Углеродный эндопротез тазобедренного. Журнал клинической и экспериментальной ортопедии им. Г.А. Илизарова №2, 2015 г., с. 32-35. **3.** *Набиев Ф.Х., Головин Р.В., Золкин П.И.* Состав углепластика для устранения дефектов кости. http://www.findpatent.ru/patent/234/2341295.html © FindPatent.ru - патентный поиск, 2012-2016 г.

Bibliography (transliterated): 1. *Fandeev V.P., Samohina K.*S. Konstruirovanie protezov mezhpozvonkovyh diskov // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. – 2014. – № 6.; URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=16338 (data obrashhenija: 19.02.2016). **2.** P.I. *Zolkin, G.M. Kavalerskij*. Uglerodnyj jendoprotez tazobedrennogo. Zhurnal klinicheskoj i jeksperimental'noj ortopedii im. G.A. Ilizarova №2, 2015 g., s. 32-35. 3. *Nabiev F.H., Golovin R.V., Zolkin P.I.* Sostav ugleplastika dlja ustranenija defektov kosti. http://www.findpatent.ru/patent/234/2341295.html © FindPatent.ru - patentnyj poisk, 2012-2016 g

УДК 691.981

В.С. ГУСАРЕВ, канд. техн. наук, Одесса, Украина

ГПС И АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Структурні схеми ГПС організовані за принципом предметних ділянок, які реалізують модульні принципи. Алгоритми функціонування ГПС утворюють систему виразів за аналогією з алгоритмами функціонування РТК.
Ключові слова: структурні схеми ГПС, модульний принцип, алгоритм функціонування

Структурные схемы ГПС организованы по принципу предметных участков, которые реализуют модульные принципы. Алгоритмы функционирования ГПС образуют систему выражений по аналогии с алгоритмами функционирования РТК.
Ключевые слова: структурные схемы ГПС, модульный принцип, алгоритм функционирования

Structural diagram of GPS [1], organized on the principle of substantive plots that implement modular principles. Algorithms of functioning, they form a system of expressions similar to RTK.
Keywords: structural diagram of GPS, modular principle, algorithms of functioning

Структурные схемы ГПС[1] организованы по принципу предметных участков, которые реализуют модульные принципы. Алгоритмы функционирования ГПС образуют систему выражений по аналогии с алгоритмами функционирования РТК. В обоих случаях отдельные станки (обрабатывающие центры) связаны между собой действиями робота, поэтому объединяющим действием является алгоритм его работы.

Алгоритм функционирования ПР содержит операции действия, которые обеспечивают связь «магазин - накопитель - обрабатывающий станок».

Типовые структуры ГПУ-РТК содержат, чаще всего, один магазин-накопитель и несколько технологических модулей-станков, связь между ними осуществляет ПР.

В ГПС для обработки технологических объектов (ТО) типа корпусных деталей применяют в качестве связующего и перегружающего средства робот - тележку (РК). Для ТО типа тел вращения применяются ПР подвесные к эстакаде, или, если ТО перемещаются в таре, то используется робот-тележка(РК). ПР и РК могут быть одноместными и двухместными, поэтому при одинаковой структуре ГПУ-РТК могут значительно различаться алгоритмом функционирования из-за различий в обслуживании ПР технологической системы. В технологической системе ГПС-РТК наблюдается поточность прохождения ТО по ТС, но каждый раз перед тем, как ТО попадет в ТС, он извлекается из магазина накопителя, где ТО постоянно сохраняется. Существуют разные причины организации такой структуры.

© В.С. Гусарев, 2016

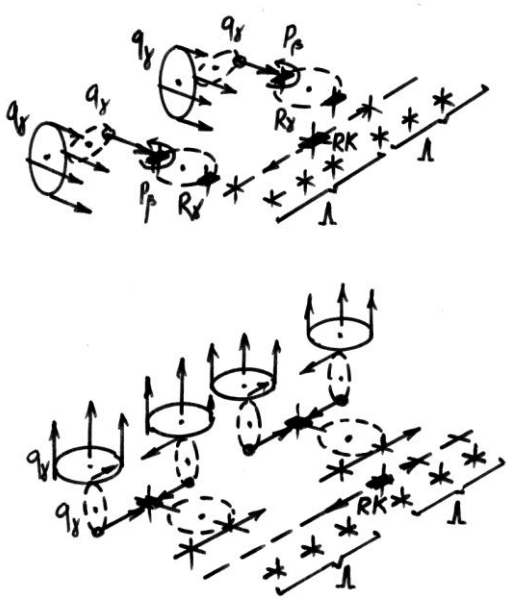


Рисунок 1 – ГПС – РТК

Первая, наиболее часто встречается при обработке корпусных деталей, связана с изменением базирования ТО и необходимости переустановки ТО с одного спутника на другой, в связи с этим, производится изменение несущего ТО спутника ПР.

Вторая, наиболее часто встречаемая причина, возникает при транспортировке мелких ТО в таре. В этом случае на обработку поступает партия ТО после обработки, она в таре возвращается в магазин-накопитель.

Так организованная система становится независимой по структуре и по алгоритму функционирования. В такой системе необходим второй ПР, который производит извлечение ТО из тары и ввод его в станок, а после обработки возвращение обратно в тару. Обычно ПР, выполняющий эту функцию, встраивается в ТС , образуя с ним модульную подсистему РТК [2].

Рассмотрим некоторые технические решения упомянутых видов ГПС.

Пусть ГПУ-РТК состоит из магазина-накопителя и двух станков (рис.1). На первом выполняются операции $A_1 A_i$, на втором – $B_1 B_i$. Магазин содержит ячейки: с заготовками (***U***), полуобработанными деталями (***Л***) и свободными ***(V)*** для готовых деталей. Работа ГПУ-РТК заключается, например, в обработке следующей серии ТО: a_1,... a_1 a_2,… $в_1$,... $в_1$ $в_2$, … $a_1в_1$,… $a_1a_2в_1$, … $a_1в_1в_2$,… $a_1a_2в_1в_2$.

Состав ГПС в операторном представлении прост, сложность представляет алгоритм действия промышленного робота.

$$(U))\downarrow R,$$

$$S_1 = (A_1qqA_2qq)\downarrow R,$$

$$(\Lambda))\downarrow R,$$

$$S_2 = (B_1qqB_2qq)\downarrow R,$$

$$(V))\downarrow R.$$

Рассмотрим его функционирование. ПР забирает (1) обработанную деталь со станка (S_2) , переносит (2) в ячейку (V) и оставляет там (3), перемещается (4) к ячейке (Λ), берет (5) полуобработанную деталь и переносит (6) в станок (S_2), загружает (7) его, далее перемещается (8) к станку(S_1), забирает (9) деталь и переносит (10) ее в ячейку (Λ), загружает (11) ее, затем перемещается(12) к ячейке (U), берет (13) заготовку, переносит (14) в станок (S_1) и загружает(15) его, далее возвращается(16) к станку (S_2), конец цикла.

Схема алгоритма функционирования ПР приведена на рис. 2.

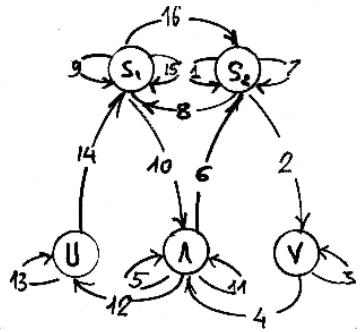


Рисунок 2 – Граф-схема алгоритма функционирования ПР в ГПУ-РТК

Матрицы связи и смежности, и длительности действий ПР имеют вид:

	U	A_i	Λ	B_i	V
U	13	14	0	0	0
A_i	0	9,15	10	16	0
Λ	12	0	5,11	6	0
B_i	0	8	0	1,7	2
V	0	0	4	0	0

	U	A_i	Λ	B_i	V
U	1	1	0	0	0
A_i	0	11	1	1	0
Λ	1	0	11	1	0
B_i	0	1	0	11	1
V	0	0	1	0	1

	U	A_i	Λ	B_i	V
U	τ_3	τ_2	0	0	0
A_i	0	$\tau_3\tau_3$	τ_2	τ_1	0
Λ	τ_1	0	$\tau_3\tau_3$	τ_2	0
B_i	0	τ_1	0	$\tau_3\tau_3$	τ_2
V	0	0	τ_1	0	τ_3

Подставляя в матрицу смежности вместо булевых единиц значения длительности действия ПР(в нашем случае это робот - кар) τ_1, τ_2, τ_3 и суммируя, получим следующее выражение длительности работы ПР:

$$\tau R = 4\tau_1 + 4\tau_2 + 8\tau_3,$$

или в общем виде

$$\tau R = 2S(\tau_1 + \tau_2 + 2\tau_3),$$

где S – число обслуживаемых станков,

τ_3 –время загрузки (выгрузки),

τ_2 – время перемещения ПР с деталью.

τ_1 – время перемещения ПР без детали.

Далее, если последнее аддитивное выражение заменить на мультипликативное и подставить значения вероятности срабатывания r_1, r_2, r_3, то получим:

$$rR = (r_1 \cdot r_2 \cdot r^2{}_3)^{2S}.$$

Естественно, число действий будет: $HR = H_0 + (S - 1)H + 1,$

где $H_0 = 7; H = 8.$

Если структура ГПУ-РТК содержит один магазин накопитель, в котором через одну объединенную ячейку входят и выходят заготовки полуфабрикаты и готовые изделия при том же числе станков $S = 2,$ состав ГПУ-РТК станет проще.

$$(V)\downarrow R(U)\downarrow R,$$
$$S_1 = (A_1 qq A_2 qq)\downarrow R,$$
$$S_2 = (B_1 qq B_2 qq)\downarrow R.$$

Работа ПР строится по простому алгоритму аналогично рассмотренному выше.

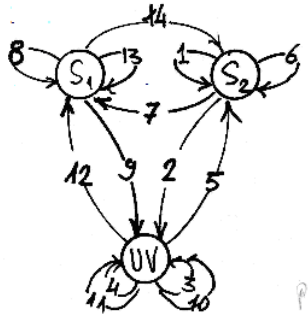


Рисунок 3 – Граф - схемы алгоритмов функционирования ПР
в ГПУ-РТК с объединенной ячейкой *(VU)*

Матрицы связи и смежности, и длительности действий ПР имеют вид:

	VU	A_i	B_i
VU	3,4,10,11	12	5
A_i	9	8,13	14
B_i	2	7	1,6

	VU	A_i	B_i
VU	1111	1	1
A_i	1	11	1
B_i	1	1	11

	VU	A_i	B_i
VU	$\tau_3\tau_3\tau_3\tau_3$	τ_2	τ_2
A_i	τ_2	$\tau_3\tau_3$	τ_1
B_i	τ_2	τ_1	$\tau_3\tau_3$

Следовательно:

длительности цикла работы ПР – $\tau R = 2\,S(\tau_1 + 2\tau_2 + 4\tau_3)$,

надежности функционирования – $rR = (r_1 \cdot r^2{}_2 \cdot r^4{}_3)^{2\,S}$,

во всех этих формулах S – число станков в системе.

Получим следующие формулы для расчетов: числа движений:

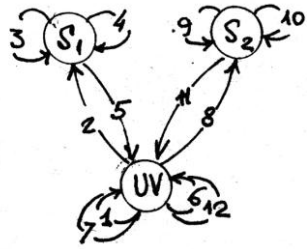
$$HR = H_0 + (S - 1)H + 1,$$

где $H = 6;\ H = 7,$

Наиболее простое решение ГПУ-РТК с точки зрения алгоритма функционирования ПР (или РТ) получается при использовании двурукого ПР (или двуместного РТ) и технологическом оборудовании, допускающем многостороннюю обработку (рис. 3).

$$(V)\downarrow R(U)\downarrow R,$$
$$S_1 = (A_1 qq A_2 qq)\downarrow R,$$
$$S_2 = (B_1 qq B_2 qq)\downarrow R,$$

Алгоритм функционирования в этом случае не содержит перемещений ПР без детали , как это было в раннее.



Матрицы связи и смежности, и длительности действия имеют вид:

	UV	S_1	S_2
UV	1,6,7,12	2	8
S_1	5	3,4	0
S_2	11	0	9,10

	UV	S_1	S_2
UV	1111	1	1
S_1	1	11	0
S_2	1	0	11

	UV	S_1	S_2
UV	$\tau_3\tau_3\tau_3\tau_3$	τ_2	τ_2
S_1	τ_2	$\tau_3\tau_3$	0
S_2	τ_2	0	$\tau_3\tau_3$

Отсюда следует: длительность цикла действия ПР - $\tau R = 2S(\tau_2 + 2\tau_3)$,

надежность функционирования - $rR = (r_2 \cdot r^2_3)^{2S}$.

число действий $HR = H_0 + (S - 1)H + 4$, при $H_0 = 2$; $H = 6$.

Получим $HR = 2 + (S - 1)6 + 4$.

В рассматриваемой ГПС отсутствует ожидание ПР Исследование надежности функционирования ГПС(τ_0) и действия, связанные с перемещениями ПР без изделия (τ_1), допустимое время его работы составит [τS] = 10 ЕВ, при этом надежность функционирования, если r_2 = 0,995; r_3 = 0,99, будет $rR = (0{,}995 \cdot 0{,}99^2)^4 = 0{,}817$, т.е. из 10^4 циклов вероятность отказами будут всего 183 цикла.

Исследования надежности функционирования ГПС, проводимые в разных странах, указывают на единственный фактор, приводящий к некоторым потерям надежности - это операции перегрузки технологического объекта со станка на станок, которые выполняет ПР.

Поэтому японские специалисты считают, что оптимальное число станков обслуживаемое одним ПР два, при одном магазине-накопителе заготовок и спутников, являющейся многоразовой, используемой тарой.

Сложность ГПС определять следует по трем показателям гибкости [2]:

- числом возможных поверхностей обработки и количеством сформированных из них комбинаций деталей,
- числом технологических операций и количеством маршрутов обработки, сформированных на их массиве,
- числом станков и количеством инструментов, размещенных в них.

Кроме указанных показателей, следует учитывать длительность: цикла технологического и цикла выпуска, а так же длительность переходного процесса при обработке разнообразных деталей, не малое значение имеет организация очереди деталей, как объекта обслуживания станками, как субъектами системы обслуживания, которой и является ГПС.

Список использлванных источников: **1.** *Гусарев В.С.* Маневренные и самоорганизующиеся (технологические) машины-автоматы./ Отделение механики и процессов управления. АН СССР. Теория машин автоматического действия. –М. Наука.1970. с.63-74. **2.** Структуры гибких производственных систем. / Інфораційні технології в освіті, науці та виробництві. //Зб. Наукових праць. Вип.. 3(8).2015.с.143-150. **3**. Гибкая сервисная система Тошиба для гибких производственных систем.// Японская техника и промышленность. Станкостроение и роботостроение Вып.1. «Промтех». 1982 .с.98-100.

Bibliography (transliterated): 1. *Gusarev V.S.* Manevrennye i samoorganizujushhiesja (tehnologicheskie) mashiny-avtomaty./ Otdelenie mehaniki i processov upravlenija. AN SSSR. Teorija mashin avtomaticheskogo dejstvija. –M. Nauka.1970. s.63-74. **2.** Struktury gibkih proizvodstvennyh sistem. / Inforacijni tehnologiї v osviti, nauci ta virobnictvi. //Zb. Naukovih prac'. Vip.. 3(8).2015.s.143-150. **3.** Gibkaja servisnaja sistema Toshiba dlja gibkih proizvodstvennyh sistem.// Japonskaja tehnika i promyshlennost'. Stankostroenie i robotostroenie Vyp.1. «Promteh». 1982 .s.98-100.

УДК 621.763-233.3

А.Ю. ДОВГОПОЛОВ,
С.С. НЕКРАСОВ, канд. техн. наук, Суми, Україна

РОЗ'ЄМНІ З'ЄДНАНЯ ДЕТАЛЕЙ, ВИГОТОВЛЕНИХ З ВУГЛЕПЛАСТИКУ

З метою дослідження можливості утворення компонентів роз'ємних з'єднань деталей машин з вуглепластику, була проведена порівняльна характеристика різних критеріїв міцності, напружень та деформацій що виникають в основних роз'ємних з'єднаннях з аналогічними параметрами виробів з вуглепластиків. На основі проведеного порівняльного аналізу встановлена можливість, розрахунку оптимальних характеристик матеріалу, компонентів з'єднання. Завдяки чому запропонована можливість застосування вуглепластику у роз'ємних з'єднаннях, для яких основні критичні напруження задовольнятимуть умовам міцності та жорсткості даного композиційного матеріалу, при використанні правильної схеми армування, де основні силові фактори які виникають в з'єднанні направлені в напрямку армування волокон.
Ключові слова: вуглепластик; роз'ємні з'єднання; напруження; міцність; жорсткість

С целью исследования возможности создания компонентов разъемных соединений деталей машин из углепластика, была проведена сравнительная характеристика различных критериев прочности, напряжений и деформаций, возникающих в основных разъемных соединениях с аналогичными параметрами изделий из углепластика. На основе проведенного сравнительного анализа установлена возможность расчета оптимальных характеристик материала, компонентов соединения. Благодаря чему получена возможность применения углепластика в разъемных соединениях, для которых основные критические напряжения удовлетворяют условиям прочности и жесткости данного композиционного материала, при использовании правильной схемы армирования, где основные силовые факторы, возникающие в соединении, направлены в направлении армирования волокон.
Ключевые слова: углепластик; разъемные соединения; напряжения; прочность; жесткость

In order to study the possibility of creating components detachable joints of machine parts from CFRP, was held a comparative analysis of various strength criteria, voltages and strains arising in the main detachable joints with the same parameters at the CFRP products. On the basis of the comparative analysis was established the possibility calculate the optimum material properties, the compound of components. Due to this there is the possibility of using CFRP in detachable joints, for which the main critical voltages satisfy the conditions of the strength and stiffness of the composite material, using the proper reinforcement scheme, where the main force factors arising in connection directed towards the reinforcement fibers.
Keywords: CFRP; detachable connections; voltages; strength; rigidity

Постановка проблеми. Використання нових матеріалів розкриває нові можливості для виготовлення, машин та механізмів з високим ККД, зниженим енергоспоживанням та малою масою. Останнім часом, вуглепластик, почали широко використовувати для виготовлення корпусних деталей машин. Це матеріал, який має високу граничну міцність (1000 - 2600 МПа) та низький коефіцієнт тертя (в парі, «вуглепластик-сталь 45» значення коливається в межах від 0,1 до 0,17 в залежності від дослідних

© А.Ю. Довгополов, С.С. Некрасов, 2016

умов), за рахунок використання в своєму складі, вуглецевих волокон. Саме завдяки задовільним даним характеристикам, вважається можливим, виготовлення компонентів роз'ємних з'єднань деталей машин.

Виготовлення роз'ємних з'єднань з вуглепластику є складним інженерним завданням. Оскільки завдяки анізотропним властивостям, досить складно дослідити поведінку вуглепластику при тому чи іншому навантажені. Саме тому, для його успішного вирішення, необхідно розрахувати оптимальні характеристики матеріалу компонентів з'єднання.

Основним завданням на етапі розробки компонентів роз'ємних з'єднань з вуглепластику є передбачення того, наскільки воно буде здатне функціонувати в заданих експлуатаційних умовах. Це вимагає врахування напружень і деформацій, що виникають в з'єднанні під дією навантажень, а також розрахунку різних критеріїв міцності деталей з'єднання. При цьому визначаються не тільки граничні напруження і прогресуюче руйнування, але й потрібно врахувати процеси, пов'язані з розшаруванням, виникненням і зростанням тріщин, а також цілий ряд інших фізичних ефектів.

Саме тому, для вирішення одного із основних завдань, створення компонентів роз'ємних з'єднання з вуглепластику, запропоновано порівняти напружено-деформований стан, основних роз'ємних з'єднань з напруженнями, деформаціями та різними критеріями міцності для виробів з вуглепластику.

Метою даної роботи є визначення можливості застосування вуглепластику для виготовлення компонентів роз'ємних з'єднань, за рахунок проведення порівняльної характеристики різних критеріїв міцності, напружень та деформацій що виникають в основних роз'ємних з'єднаннях з аналогічними параметрами вуглепластикових виробів

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питанням дослідження напружено – деформованого стану основних з'єднань в авіабудуванні присвяченні роботи багатьох вітчизняних та зарубіжних вчених. В аналітичному огляді Артюхина Ю. П. міститься досить детальний аналіз методик для дослідження напружено-деформованого стану (НДС) з'єднань з безперервним з'єднувальним шаром (наприклад, клейових) [2]. Запропоновані в роботі Карпова Я. С. нові способи з'єднання композиційних матеріалів (КМ) базуються на комбінації безперервного з'єднувального елемента (клей, будь який інший з'єднувальний матеріал) з дискретними кріпильними елементами (штифти, шайби, ребра) [8].

Механічні з'єднання (заклепкові, болтові, нарізні і т.п.) є основним способом складання конструкцій, та залишається таким і для деталей і агрегатів з композиційних матеріалів. Роботи Карпова Я.С., Воробья В.В. та Сироткина О.С. присвяченні дослідженню напружено-деформованого стану механічних з'єднань з композиційних матеріалів [9-12]. Baker A.A. та

Niu M.C. досить детально, описали, в своїх роботах, розробку основних типів з'єднань для деталей літальних апаратів [3, 13].

Durao L. M., Матвиенко В. А. в своїх роботах пов'язаних з механічною обробкою сучасних композиційних матеріалів встановили, що даний процес є вельми ємким та дорогим, та вимагає застосування нового інструменту та обладнання [5, 14]. Карпов Я. С., у своїй роботі присвяченій дослідженню з'єднанню високонавантажених деталей з композиційних матеріалів, ґрунтуючись на запропонованих способах з'єднань деталей з КМ, стверджує, що традиційні види з'єднань, які активно застосовуються для металевих конструкцій, малоефективні для композитів [8]. Продовжуючи досліджувати з'єднання деталей з композиційних матеріалів Карпов Я. С., у своїй більш пізній роботі встановив, що для конструкцій з КМ слід застосовувати інші, нетрадиційні види з'єднань – мікрошліфтове (рис. 1), тобто з'єднання з поздовжніми і поперечними зв'язками, які утворюють гетерогенну структуру КМ, не порушують цілісності волокон і завдяки мінімізації кріпильних елементів в меншій мірі деформують напружене поле при передачі зусиль від однієї деталі до іншої [15].

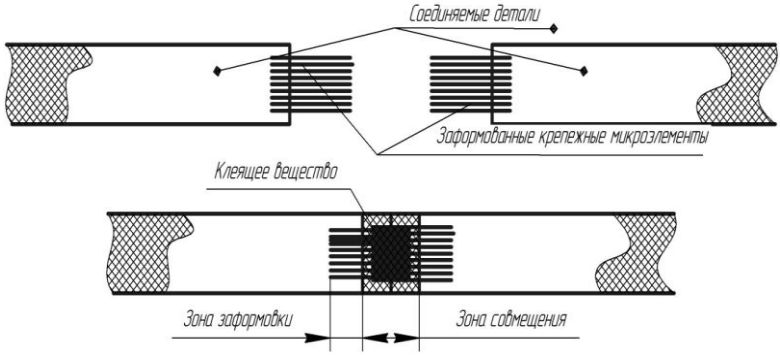


Рисунок 1 – Спосіб з'єднання
з поздовжніми заформованими кріпильними елементами [15]

Незважаючи на високу ціну КМ, складність ремонту і з'єднання конструкцій з КМ, композити активно впроваджують у військову техніку, машинобудування, спорт і медицину. Саме тому, задача отримання якісних роз'ємних з'єднань з вуглепластику є актуальною задачею.

При опрацюванні публікацій, в яких піднята проблема дослідження напружено-деформованого стану вуглепластику, публікацій де описанні різноманітні з'єднання деталей літальних апаратів, було встановлено що раніше, питання порівняльного аналізу різних критеріїв міцності, напружень

та деформацій що виникають в роз'ємних з'єднаннях (шпонковому, шліцьовому та нарізному) з аналогічними параметрами вуглепластикових виробів, ніким з вітчизняних та зарубіжних вчених досить детально не розглядалося. Саме тому в роботі і був проведений даний аналіз, щоб встановити можливість досягнення поставленої мети.

Викладення основного матеріалу

Напружено-деформований стан шпонкового, шліцьового та нарізного роз'ємних з'єднань

З'єднання за можливістю розбирання ділять на нероз'ємні, які не можна розібрати без руйнування або пошкодження складових частин(заклепкові, зварні),та роз'ємні, які можна розібрати без порушення цілісності складових частин деталей або їх елементів. Найбільш розповсюдженими в машинобудуванні видами роз'ємних з'єднань є: нарізні, шпонкові, шліцові, профільні [6].

З'єднання вважаються досить важливими елементами конструкцій. Більшість аварій та інші несправності в роботі машин обумовленні незадовільною конструкцією з'єднань.

Основним критерієм працездатності і розрахунку з'єднання вважається його міцність – статична та тривала. Також необхідно враховувати кількість складань деталей без руйнування поверхонь.

В зв'язку із необхідністю зберігання точності під навантаженням з'єднання повинні задовольняти умову жорсткості.

Міцність є основним критерієм працездатності нарізних з'єднань. Під дією осьової сили (сили затяжки) в стержні гвинта виникають напруги розтягу – в тілі гайки – стиснення , в нитках різі – зминання, зрізу. Головним критерієм працездатності стандартних кріпильних деталей прийнята: міцність стержня на розтяг, і по ній ведуть розрахунок болтів, гвинтів і шпильок. На рис. 2 показаний розподіл напружень та деформацій у нарізному з'єднанні [6].

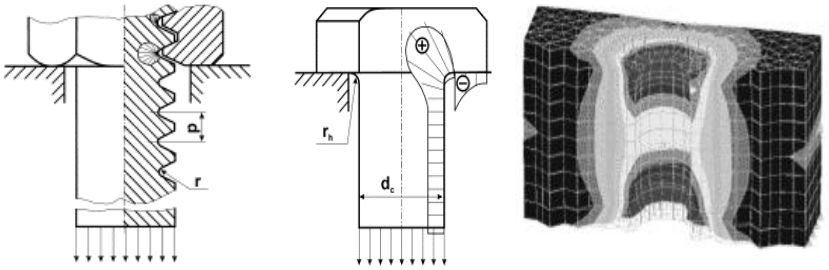


Рисунок 2 – Розподіл напружень та деформацій в нарізному з'єднанні

Шпонкові з'єднання з призматичними шпонками найбільш застосовуванні в машинобудуванні. Момент **T** з валу на маточину передається боковими гранями шпонки. На цих бокових гранях виникають напруження зминання $\sigma_{зм}$, а в повздовжньому розрізі шпонки – напруження зрізу $\tau_{зр}$ [4].

Опір бокових поверхонь зубів зношуванню і зминанню – основні критерії працездатності шліцьових з'єднань. Нерухомі шліцьові з'єднання розраховують тільки на зминання (при відсутності осьових навантажень). Основні види напружень шпонкового та шліцьового з'єднань представлені на рис. 3.

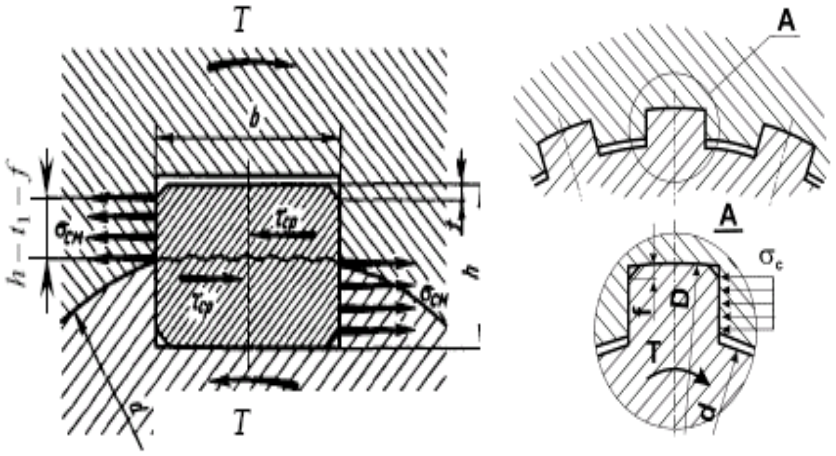


Рисунок 3 – Силові схеми шпонкового та шліцьового з'єднань

Властивості вуглепластику при різних напружено - деформованих станах. Для проектування будь якого виробу основне це, наявність достовірної інформації про механічні властивості матеріалу. Разом з тим, властивості вуглепластику залежать від багатьох факторів, основні це характер армування, технологія виготовлення, та подальша термічна обробка.

Переваги та високі механічні характеристики вуглепластику (та інших композиційних матеріалів) найбільш істотно реалізуються в орієнтованих матеріалах, армованих паралельними волокнами, тобто в так званих односпрямованих шарах, шляхом укладання таких шарів у різних напрямках (рис. 4).

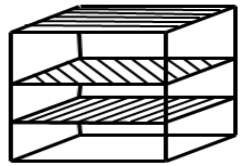


Рисунок 4 – Багатошаровий вуглепластиковий матеріал
із односпрямованих шарів [2]

Волокна сприймають основну частку навантаження у вуглепластику гранична міцність та питома жорсткість даних армуючих елементів, значно вища за деякі метали. Порівняння властивостей деяких композиційних матеріалів з металами представленні в табл. 1.

Міцність вуглепластику залежить від багатьох факторів, одним із яких є напрямок прикладеної сили, відносно волокон, тому його застосування при тривимірному навантаженні характеризується низькою міцністю при нормальних навантаженнях. Залежність міцності вуглепластику від напрямку прикладання сили представлена на рисунку 2. Згідно графіку представленого на рисунку 5, вуглепластик, краще за металеві сплави, витримує поздовжні навантаження, а за поперечними навантаженнями – істотно їм поступається. Саме тому раціонально застосовувати його при роботі на розтяг або стискання вздовж волокон. Найбільш перспективними, для отримання компонентів роз'ємних з'єднань, на сьогодні вважаються композиційні матеріали армовані вуглецевими волокнами – вуглепластики.

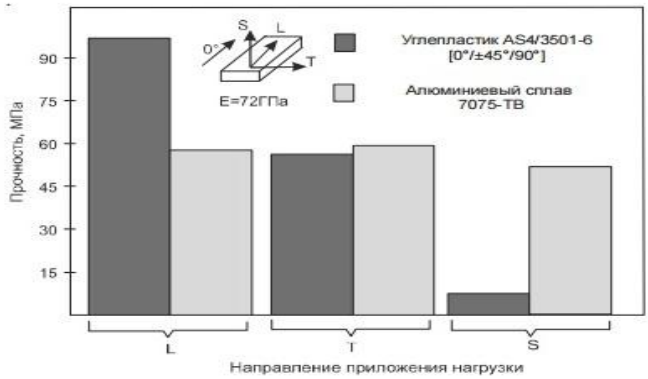


Рисунок 5 – Залежність міцності вуглепластику
від напрямку прикладання сили [5]

Таблиця 1 – Порівняння властивостей композиційних матеріалів з конструкційними матеріалами [3]

Параметри	Скло-пластик	Вугле-пластик	Алюміній 7050-Т7451	Сталь РН138М0
Густина·10^{-3}, кг/м^3	2,1	1,5	2,82	7,76
Межа міцності, МПа:				
при розтяганні вздовж волокон	1250	1130	485	1385
при розтяганні перпендикулярно волокнам	35	42	-	-
при стисканні вздовж волокон	600	1130	-	-
при зсуві	68	63	-	-
Питома міцність при розтяганні вздовж волокон·10^{-3}, м.	83	73	172	178
Модуль пружності, ГПа:				
вздовж волокон	45	137	72	205
перпендикулярно волокнам	12	7	-	-
Модуль зсуву, ГПа	4,5	4,2	27	80
Питома жорсткість·10^{-6} , м	22	88	25,5	26,4

Висновки. У результаті проведеної порівняльної характеристики різних критеріїв міцності, напружень та деформацій що виникають в основних роз'ємних з'єднаннях з аналогічними параметрами виробів з вуглепластиків було визначено що, утворення компонентів роз'ємних з'єднань із даного матеріалу, бажане лише у випадку, коли основні напруження в з'єднанні направленні в повздовжньому напрямку (вздовж армуючих елементів). Оскільки, як було визначено вище даний матеріал краще за металеві сплави, витримує поздовжні навантаження, а за поперечними навантаженнями – істотно їм поступається. Це одна із основних умов, яка має виконуватися при створені роз'ємних з'єднань з цього матеріалу.

Застосувати вуглепластик можливо, у роз'ємних з'єднаннях, у яких основні критичні напруження задовольнятимуть умовам міцності та жорсткості даного композиційного матеріалу. Вуглепластик ми можемо використати для утворення нарізних, шпонкових та шліцьових з'єднань, якщо армуючі елементи композиту в з'єднанні будуть направленні у напрямку прикладення основних напружень.

Створити компоненти роз'ємних з'єднань із розглянутого вище композиційного матеріалу можливо, оскільки згідно отриманої в результаті дослідження інформації робимо висновок що, по питомим характеристикам міцності та жорсткості у поздовжніх напрямках, цей матеріал не поступаються іншим конструкційним матеріалам, з яких виготовлялися компоненти з'єднань, а порівняно з деякими навіть їх перевищує.

Список використаних джерел: 1. *Анурьев В. И.* Справочник конструктора-машиностроителя / В. И. Анурьев. – М. Машиностроение, 2001. **2.** *Артюхин Ю. П.* Напряжения в клеевых соединениях / Ю. П. Артюхин // Исследования по теории пластин и оболочек. – Киев: Изд-во Киев. гос. ун-та, 1973. – Вып. 10. – С. 3 - 27. **3.** *Baker A. A.* Composite Materials for Aircraft Structures / A. A. Baker. – Eurospan, 2004. – 400 p. **4.** *Верещака С. М.* Механіка композиційних матеріалів: навчальний посібник / М. Верещака. – Суми: Сумський державний університет, 2013. – 160 с. **5.** *Durao L. M.* Machining of hybrid composites : Ph.D. dissertation / L. M. Durao. – Porto, 2005. – 242 p. **6.** *Криворучко Д. В.* Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов (аналитический обзор): монография / Д. В. Криворучко, В. А. Залога, В. А. Колесник и др.; под общей ред. проф. В.А. Залоги. – Сумы : Университетская книга, 2013. 272с **7.** *Устюгов И. И***.** Детали машин. Учебное пособие для учащихся заочных техникумов / И. И. Устюгов – М.: Высшая школа, 1973. – 472 с. **8.** *Карпов Я. С.* Соединения высоконагруженных деталей из композиционных материалов. Сообщ. 1.Конструктивно-технологические решения и оценка их работоспособности / Я. С. Карпов // Пробл. прочности. – 2006. – № 3. – С. 23 – 33**. 9.** *Воробей В. В.* Соединения конструкций из композиционных материалов / В. В. Воробей, О. С. Сироткин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 168 с. **10.** *Карпов Я. С.* Соединения деталей и агрегатов из композиционных материалов / Я. С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 359 с. **11.** *Карпов Я. С.* Научные основы решения проблемы соединения высоко-нагруженных деталей летательных аппаратов из композиционных материалов /Я. С. Карпов // Технологические системы. – К., 2000. – Вып. 3. – С. 36 – 40. **12.** *Сироткин О. С.* Технология и механика соединений / О. С. Сироткин,В. Б. Литвинов, В. И. Гришин. – М.: Арктика, 2000. – 314 с. **13.** .*Niu M. C.* Composite Airframe structures / M. C. Niu. – Hong Kong : Conmilit Press Ltd., 1992. – 686 p. **14.** *Матвиенко В. А.* Анализ современного уровня и перспектив конструктивно-технологического совершенствования соединений полимерных композиционных материалов / В. А. Матвиенко // Материалы совещания – М.: НИАТ, 1986. – с. 3-12. **15.** *Карпов, Я. С.* Проектирование и конструирование соединений деталей из композиционных мате- риалов [Текст] / Я. С. Карпов, С. П. Кривенда. – Харьков: ХАИ. – 128 с.

Bibliography (transliterted): : 1. *Anur'ev V. I.* Spravochnik konstriktora-mashinostroitelja / *V. I. Anur'ev*. – M. Mashinostroenie, 2001. **2.** *Artjuhin Ju. P.* Naprjazhenija v kleevyh soedinenijah / Ju. P. Artjuhin // Issledovanija po teorii plastin i obolochek. – Kiev: Izd-vo Kiev. gos. un-ta, 1973. – Vyp. 10. – S. 3 - 27. **3.** *Baker A. A.* Composite Materials for Aircraft Structures / *A. A. Baker*. – Eurospan, 2004. – 400 p. **4.** *Vereshhaka S. M.* Mehanika kompozicijnih materialiv: navchal'nij posibnik / M. Vereshhaka. – Sumi: Sums'kij derzhavnij universitet, 2013. – 160 s. **5.** *Durao L. M.* Machining of hybrid composites : Ph.D. dissertation / *L. M. Durao*. – Porto, 2005. – 242 p. **6.** *Krivoruchko D. V.* Mehanicheskaja obrabotka kompozicionnyh materialov pri sborke letatel'nyh apparatov (analiticheskij obzor): monografija / *D. V. Krivoruchko, V. A. Zaloga, V. A. Kolesnik i dr*.; pod obshhej red. prof. *V.A. Zalogi*. – Sumy : Universitetskaja kniga, 2013. 272s **7.** *Ustjugov I. I.* Detali mashin. Uchebnoe posobie dlja uchashhihsja zaochnyh tehnikumov / *I. I. Ustjugov* – M.: Vysshaja shkola, 1973. – 472 s. **8.** *Karpov Ja. S.* Soedinenija vysokonagruzhennyh detalej iz kompozicionnyh materialov. Soobshh. 1.Konstruktivno-tehnologicheskie reshenija i ocenka ih rabotosposobnosti / *Ja. S. Karpov* // Probl. prochnosti. – 2006. – № 3. – S. 23 – 33. **9.** *Vorobej V. V.* Soedinenija konstrukcij iz kompozicionnyh materialov / V. V. Vorobej, O. S. Sirotkin. – L.: Mashinostroenie, 1985. – 168 s. **10.** *Karpov Ja. S.* Soedinenija detalej i agregatov iz kompozicionnyh materialov / Ja. S. Karpov. – H.: Nac. ajerokosm. un-t «Har'k. aviac. in-t», 2006. – 359 s. **11.** *Karpov Ja. S.* Nauchnye osnovy reshenija problemy soedinenija vysoko-nagruzhennyh detalej letatel'nyh apparatov iz kompozicionnyh materialov /*Ja. S. Karpov* // Tehnologicheskie sistemy. – K., 2000. – Vyp. 3. – S. 36 – 40. **12.** *Sirotkin O. S.* Tehnologija i mehanika soedinenij / *O. S. Sirotkin,V. B. Litvinov, V. I. Grishin*. – M.: Arktika, 2000. – 314 s. **13.***Niu M. C.* Composite Airframe structures / *M. C. Niu*. – Hong Kong : Conmilit Press Ltd., 1992. – 686 p. **14.** *Matvienko V. A.* Analiz sovremennogo urovnja i perspektiv konstruktivno-tehnologicheskogo sovershenstvovanija soedinenij polimernyh kompozicionnyh materialov / *V. A. Matvienko* // Matepialy soveshhanija – M.: HIAT, 1986. – s. 3-12. **15.** *Karpov, Ja. S.* Proektirovanie i konstruirovanie soedinenij detalej iz kompozicionnyh mate- rialov [Tekst] / Ja. *S. Karpov, S. P. Krivenda*. – Har'kov: HAI. – 128 s.

УДК 621.9.06.-259.001.2

И.П. КОНОВАЛОВ, Одесса, Украина

СТРУКТУРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ РЕЗКИ ЛИСТА - ЯДРО МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ САПР РАСКРОЯ

У статті розглянуті питання проектування карт Розкрою, як основної складової частини ефективної технологічної підготовки для обладнання з ЧПУ плазмового, лазерного, кисневого, гідроабразивного різання та різання на гільйотинних ножицях. Проаналізовано тенденції в становленні та розвитку автоматизованих засобів програмування обладнання даного класу. Вивчено та узагальнено методи ефективної побудови технологічного процесу (ТП) з урахуванням організаційних і технологічних обмежень обладнання. Виявлено та обґрунтовано необхідність ув'язування принципів побудови САПР з точною моделлю ТП. Сформульована і побудована багаторівнева математична модель, покладена в основу побудови САПР.
Ключові слова: проектування карт розкрою, технологічна підготовка

В статье рассмотрены вопросы проектирования карт Раскроя, как основной составляющей части эффективной технологической подготовки для оборудования с ЧПУ плазменной, лазерной, кислородной, гидроабразивной резки. Проанализированы тенденции в становлении и развитии автоматизированных средств программирования оборудования данного класса. Изучены и обобщены методы эффективного построения технологических процессов (ТП) с учетом организационных и технологических ограничений оборудования. Выявлена и обоснована необходимость увязки принципов построения САПР с точной моделью ТП. Сформулирована и построена многоуровневая математическая модель, положенная в основу построения САПР.
Ключевые слова: проектирование карт раскроя, технологическая подготовка

The paper deals with the design nesting, as the main component part of an effective technological preparation for the CNC machines for plasma, laser, oxyfuel, and waterjet cutting and cutting on guillotine shears. The trends in the development of automated programming equipment of this class. Studying and generalizing methods of effective production process (PP), taking into account the organizational and technological constraints of the equipment. Spotted and the necessity of linking the principles of building CAM model with the exact PP. Formulated and built a multi-level mathematical model underlying the construction of CAM.
Keywords: design nesting, technological preparation

Введение

Заготовительный передел производства, связанный с резкой фигурных деталей из плоского листа (назовем листообработка для дальнейшего изложения), является предметом интереса многих специалистов:

– конструкторов оборудования и СЧПУ для резки листа

– проектировщиков инструментов для высокопроизводительной и высокоточной плазменной, газовой, плазменной и гидроабразивной резки

– технологов, проектирующих ТП, технологические операции (ТО), карты раскроя (КР) и управляющие программы (УП) обработки.

© И.П. Коновалов, 2016

Структура и тенденции развития листообработки

Внимание к этой области не случайно. За последние 30 лет ее относительная доля в объеме производства на машиностроительных предприятиях устойчиво растет. В некоторых случаях может превышать 50% барьер.

К листообработке можно отнести технологические процессы формирования фигурных или прямоугольных заготовок из плоских листов. Оборудование для них разделяется на три основных класса: компоновки роутер (портальные машины и листовые процессоры), координатно–пробивные пресса и ножницы. Общим для них является возможность групповой обработки множества заготовок из одного листа.

Класс «роутерной» компоновки представляет оборудование, имеющее стол, портал, движущийся вдоль него, с находящимися на нем одним или несколькими суппортами. Оснащаются газовыми, плазменными и лазерными режущими головками, а так же инструментами для резки водной струей. Это разнообразное оборудование объединяется в одну группу за счет нескольких общих свойств. Таких как применение методов резки, не передающих значительных усилий резания на компоненты станка в процессе обработки и осуществление типового цикла обработки: холостой переход к месту обработки, пробивка листа, обработка контура.

Развитие данной группы оборудования привело к появлению нескольких направлений. Таких как много - инструментальная параллельная обработка для газовой, плазменной резки; многоходовая 3D обработки по снятию фасок (BEVEL); применение высокоточных плазменных инструментов, позволяющих выполнять резку с параметрами точности и шероховатости, приближающимися к механообработке; концентрация операций на одном станке. Последнее обстоятельство фактически превращает оборудование в многоцелевой центр. Например, в случае использования на одном портале плазменного, газового, маркировочного суппортов, сверлильной головки.

В дальнейшем изложении основное внимание будет уделено анализу возможностей и построению ТП именно для этой группы оборудования.

САПР в листообработке. Тенденции развития

Суть проектирования ТО листообработки состоит в создании плана размещения деталей на листе и расчета траекторий обработки, в которых определяются точки пробивки листа резаком, направления обхода контуров, и др.

Оборудование с ЧПУ требует предварительной подготовки УП, содержащей точные координаты движений и подробные инструкции по управлению резкой. Существуют три способа формирования УП: ручной, формирование УП по ходу обработки используя макро описания и другие возможности СЧПУ, и при помощи специализированного программного

обеспечения (ПО) САПР. Первый и второй способы применимы только в простейших случаях, на производстве практически не используются.

Для создания УП резки Карт Раскроя существует множество ПО, выполненного различными разработчиками в разное время. Постоянно продолжают появляться новые системы, что свидетельствует об интересе и динамическом развития этой области. Рассматривая и сравнивая программные продукты можно отметить, что существуют большие различия в реализованном функционале и возможностях, предоставляемые каждым ПО для пользователя – технолога. Но главные отличия находятся в «классе», к которому можно отнести ПО.

Условно можно выделить три класса: САП, NEST, САПР РАСКРОЙ.

САП - система автоматизированного программирования. Родоначальником этих систем является APT, появившийся в 1960-70х годах. На языке, приближенном к естественному, пользователь описывает линии, дуги, точки контуров обработки заготовок. В нужных местах вставляет технологические команды. Система автоматически рассчитывает координаты опорных точек и получившуюся траекторию трансформирует в коды СЧПУ. Для преобразования траектории в коды СЧПУ, в APT был использован специальный модуль, который назван Постпроцессор. Это ключевое понятие и сегодня используется в САПР. Для унификации разработки Постпроцессоров было предложено имеющуюся траекторию приводить к стандартному виду, названному CLDATA. Такая схема применялась к разным станкам. От токарных до фрезерных и плазменных. Множество современных последователей APT-а внешне существенно отличаются от своего основателя: производительная графика, диалоговое построение траекторий, развитая система удобного меню, использование DXF формата. Но принцип остался старый, на входе готовая геометрия и технология, на выходе то же самое, но на языке СЧПУ.

NEST – системы САП, дополненные модулем размещения. Так как в задачу построения УП для карты раскроя входит трудоемкий процесс раскладки, очевидно, что потребовалась автоматизация решения задачи размещения заготовок на листе. Для этой цели идеология САП была расширена модулями NEST, выполняющими ручное или автоматизированное решение процесса размещения фигурных объектов. Но тесной связи, особенно в первых реализациях, между САП и NEST не предусматривалось. Тогда казалось, что такая связь не особенно нужна. Типовые реализации строятся на базе модульного принципа, где система представляет собой набор модулей, вызываемых при необходимости. Характерно, что в системах класса NEST модульность является неотъемлемой частью концепции.

САПР РАСКРОЙ - комплексные системы, основанные на моделях, которые изначально предназначены для проектирования технологии на базе структуры ТП и технологической операции (ТО). Рассчитаны потенциально

на весь возможный круг задач, который может встретиться технологу на производстве. Модульность в таких системах так же присутствует, но только на уровне реализации, а не концепции. Уровень автоматизации высок. Можно говорить о наличии «технологического» интеллекта. Имеются возможности предоставления развитых средств коммуникации с организационным ПО «верхнего уровня».

Приведенная классификация условна. Существующая САПР, относящаяся к одному классу, может иметь ряд свойств, присущих другому. Сравнительный анализ приведенных классов ПО для создания карт Раскроя, позволяет отметить достоинства и недостатки разных САПР и обратить внимание на следующее:

1. Каждый класс ПО на выходе получает одно и то же – УП. То есть с точки зрения результата они одинаковы. В условиях производства может использоваться любое ПО, вне зависимости от принадлежности к классу.

2. ПО класса САП наиболее доступно и универсально. Но не годится для автоматической интеграции с ПО верхнего уровня, т.к. не использует базовые технологические понятия и имеет высокую трудоемкость проектирования.

3. В ПО класса NEST могут быть представлены разные модули для решения одной и той же задачи. Например, модуль построения траектории для плазмы, модуль построения траектории для лазера. Таким образом, путем накопления вновь создаваемых модулей, ПО оперирует технологическими знаниями. Универсальность ограничена. Высокий уровень автоматизации возможен, но присутствуют трудности его предоставления. Логическая сложность.

4. ПО класса РАСКРОЙ предоставляет наибольший уровень автоматизации, есть элементы технологических знаний и технологического интеллекта. Так как ПО ориентировано на концепции технологического процесса, как правило, предоставляется единый модуль для решения базовых задач. Например, единый модуль расчета траекторий. Учет особенностей газовой или плазменной резки выполняется в параметрах его работы. Обеспечивает высокую автоматизацию, возможности интеграции с системами верхнего уровня, предоставляет данные, обеспечивающие командные способы работы.

Представляется разумным следующий вывод: в современных условиях в виду высокой востребованности выполнения качественной и быстрой технологической подготовки производства (ТПП) по созданию карт Раскроя, наиболее рациональной является рекомендация широкого использования и разработки специализированного ПО, относящегося к классу САПР РАСКРОЙ.

Таблица 1

Классы	**Автоматизация геометрии**	**Постпроцессор**	**Раскладка**	**Технологические знания**	**Технологический интеллект**	**Автоматизация**	**Относительная стоимость**
САП	+	+	-	-	-	-	Низкая
NEST	+	+	+	+	-	Средняя	Средняя
САПР Раскрой	+	+	+	+	+	Высокая	Высокая

Постановка задачи

Задачей исследования, освещаемого в статье, является:
- выявление технологических особенностей построения карт Раскроя и построение структуры ТО, необходимой для созданияы УП
- построение модели, отображающей структуру ТО и использование ее в основе математического обеспечения (МО) САПР РАСКРОЙ.

Построение структуры САПР РАСКРОЙ

Систематизация технологических приемов резки приводит к выявлению структурных составляющих технологических операций и их взаимосвязи. Позволяет построить структуру самой операции и ее отображения - карты раскроя.

Структура операции фигурного раскроя определяет состав необходимых подзадач САПР, их иерархические зависимости, управление порядком их вызова, требуемый для этого интерфейс пользователя, входные и выходные данные для каждой подзадачи, хранилище для накопления промежуточной информации, способы ее представления и методы доступа к ней.

Оговоримся, что пристальное внимание далее будет уделяться только операциям, выполняемым на портальном оборудовании для резки. Несомненно, что в полном ТП присутствуют многие другие операции, начиная от правки, и до транспортировки.

Листообработка является частным случаем машиностроительного производства. Соответственно, к ней применимо требование строить ТП в рамках общеизвестной структуры. Классическая структура ТП способна описать упорядоченный перечень операций, а так же подробное содержимое каждой из них, детализированное до уровня элементарного движения станка – перехода (рис. 1). Все рисунки используют упрощенную нотацию UML, в частности, символы * и 0..1 для обозначения допустимых повторений объектов структуры.

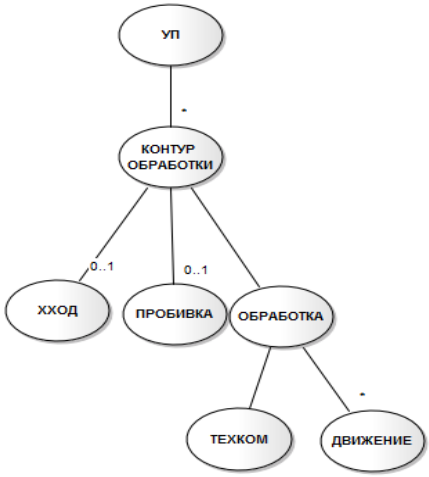


Рисунок 1

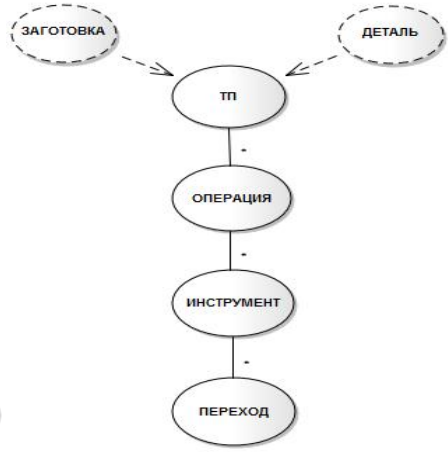


Рисунок 2

На этом этапе необходимо уточнить понятие УП для определения ее соответствия категориям ТП. УП это последовательность элементарных команд, которые может выполнить станок: команды движения по линии или дуге, команды начала и завершения резки. На принципиальном уровне это практически полный перечень. Можно сказать, что это формат “ассемблера” или машинные коды для станка с ЧПУ. “Машинная” структура УП (рис. 2) показывает, что логический уровень УП можно трактовать как соответствие многоцелевой операции, равной последовательности элементарных операций для каждого контура. Обратим внимание, что произошло первое расширение структуры. Теперь операция трактуется как последовательность резки контуров. Именно эта структура лежит в основе простейшего ПО класса САП. Такой подход не раскрывает сведения о существе построения

траектории внутри операции, и о мотивах разделения операции на последовательность контуров обработки.

Рисунок 3

Рисунок 4

Одна из очевидных особенностей ТП Раскроя - группирование деталей для их одновременной вырезки из листа. Это обстоятельство требует появления нового объекта структуры. Необходим перечень, где будут указаны места, в которых можно расположить детали с учетом углового положения. Наиболее простым решением представляется появление в структуре ТО нового объекта – Раскладка (рис. 3), состоящей из множества размещенных деталей, каждая из которых определяет контура обработки, а значит возможность построения «машинных» команд УП. Это вполне жизнеспособный подход. Следуя ему, мы получим ПО класса NEST ранней сборки.

Чем же может не устраивать в таком подходе? Схема ТП в соответствии с этим на принципиальном уровне выглядит так: есть лист и детали, которые нужно получить. Термин детали далее означает заготовки из листа, которые необходимо получить. Раскладываем детали на листе с условием не пересечения, а затем для каждой из них строим траектории, которые соединяем маршрутом холостых ходов. Выглядит вполне логично. Однако здесь не учитывается Технология. Ведь в структуре ТП пока нет никаких

сведений о вариантах технологического исполнения операций, и о соответствии выбранному инструменту. А это напрямую влияет на процесс размещения. Ведь мы размещаем не исходную деталь. Необходимо найти ответ на вопрос: что же мы размещаем на листе? Назовем этот объект – Претендент. (рис. 4).

Создание раскладки является соединением двух процессов: технологического и геометрического. В технологическом – определяем факт появления нового Претендента на размещение, вычисляем форму и размеры его оболочки. В геометрическом - располагаем на листе готовую оболочку. Число потенциальных Претендентов существенно больше исходных деталей, так как имеется возможность объединять друг с другом экземпляры деталей, применяя к ним разнообразные технологии обработки. Форма и размеры оболочки для разных Претендентов порожденных одними и теми же исходными деталями будет существенно различаться в зависимости от примененной технологии.

Приведем некоторые примеры технологических факторов, влияющих на формирование геометрии оболочки. Каждый тип резки характеризуется своим «диаметром» инструмента, который варьируется от 0.1 мм для лазерных, до 10 мм для газовой резки. И многообразием режимов пробивки: длиной подхода к контуру, диаметром расплескивания металла, и др. Эти элементы являются частью формы оболочки. Для случая учета эффекта от процесса коробления – необходимо размещать длинные поверхности деталей подальше друг от друга и прерывать рез перемычками. Размер оболочки в должен быть увеличен. В другом случае, когда коробление не опасно, можно приблизить друг к другу те же длинные поверхности и обработать смежные поверхности деталей единым резом. Соответственно, оболочка уменьшится.

Обобщение выглядит так: Размещаются не детали, а некоторые объекты (Претенденты), порожденные исходными деталями или уже созданными Претендентами путем добавления требований технологии, и вычисления соответствующей этому объединению геометрии. Их число заранее неизвестно. Процесс создания может быть рекурсивным. Как правило, существенно зависит от опыта и фантазии проектировщика. Заранее неизвестно будут ли использованы все созданные Претенденты.

На уровне САПР геометрический и технологические процессы протекают не всегда последовательно. Для них можно использовать термин «слабо» зависимы. Например, геометрия может зависеть только от некоторых параметров технологии. Эти параметры назовем ключевыми, т.к. изменения в них приведут к изменению геометрической оболочки. Наиболее яркий пример – положение точки пробивки, при раскладке одинаковых прямоугольников. Если ее одинаково зафиксировать для всех деталей, мы не достигнем плотного размещения. Но если ее вычислять по ходу геометрического размещения, получаем плотное размещение и множество

разных положений пробивки относительно детали. Другим примером, иллюстрирующим связь технологии и геометрии размещения, является зависимость расчета направления обхода траектории от места размещения детали. В основе этого случая лежит анализ уменьшения жесткости листа по мере обработки детали. В некоторых случаях направление обхода контура принимает разные значения в зависимости от места размещения детали на листе.

Приходим к выводу, что в структуре ТО необходимо ввести понятие логического уровня, содержащего технологический и геометрический контексты, которые слабо связаны друг с другом, могут иметь различную последовательность взаимного выполнения, прерываться для перехода от одного к другому и возвращаться обратно. (рис. 5).

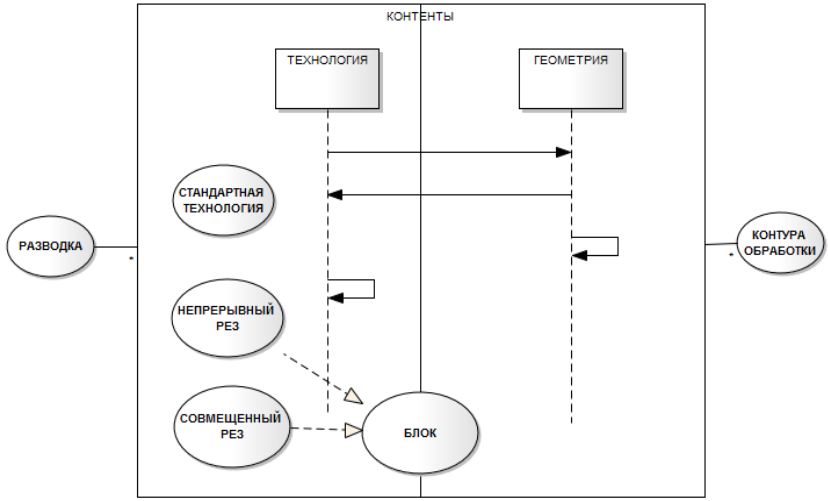


Рисунок 5

Остается решение еще одного вопроса – обеспечение пользователя технолога средствами управления процессом проектирования. Для этого предлагается использование стандартных, привычных для любого проектировщика, категорий, определяющих суть действий по составлению карты раскроя. Ими являются расчеты Размещения, Траекторий, Маршрута. Эти действия составляют еще одни логический уровень структуры ТО. Являются «строительными блоками» задач, которые легко узнаются в пользовательском интерфейсе ПО. При этом мы понимаем, что

перечисленная последовательность является не более чем иллюстрацией направления стратегического продвижения процесса проектирования карты раскроя. Структурные элементы этого уровня должны не фиксировать какой-либо жесткий порядок выполнения проектирования, и не противоречить другим уровням структуры (рис. 6).

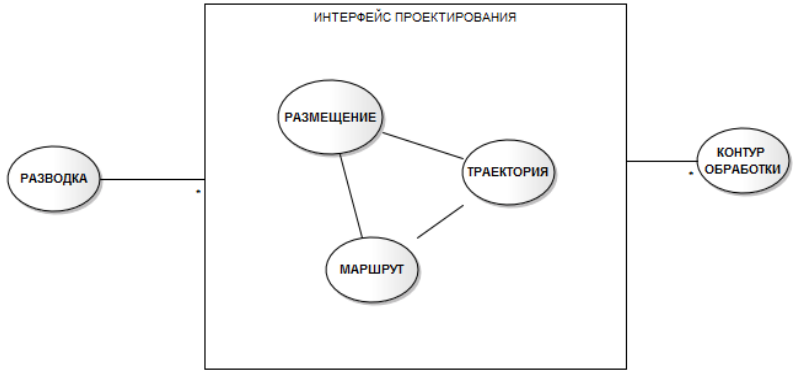


Рисунок 6

Групповая обработка деталей на листе подразумевает, что входной информацией для ПО является список деталей, упорядоченный по используемому типу материала, являющийся результатом работы планового отдела предприятия. Обычно применяемый термин – Заказ. Однако, для создания эффективного ТП, необходимо выполнить тактическое планирование, которое зависит от номенклатуры применяемого оборудования и наличия доступных заготовок-листов. Такое планирование можно осуществить только в рамках технологического подразделения. Результатом чего является появление новых структурных элементов: технологическое Задание и Фрагмент. Суть структуры этих элементов – в предоставлении разделения глобального заказа на части, доступные в одно время, на одном типе оборудования с учетом его пропускной способности и загрузки.

Элемент структуры, описывающий постпроцессор или генератор УП является выходным звеном как и в первых реализациях ПО. Однако в основе его работы используются более современные концепции. Первое – стандарт промежуточного языка для универсального описания УП. Предполагается наиболее логичным использование языка, категории и атрибуты которого полностью соответствуют структуре ТП и ТО. А в качестве средства представления и реализации стандарт XML.

Математическое обеспечение САПР

Основное назначение структуры ТП и ТО – создать основу для построения МО. МО представляет собой точную модель ПО, в виде структур данных, перечней задач, алгоритмов их решения, методов их реализации, достаточную для создания экземпляра ПО. Исследуя структуру, мы получаем перечень задач, которые необходимо решить в рамках САПР Раскрой. Влияние структуры операции проявляется на всех этапах проектирования САПР — от определения состав подзадач и управления порядком их вызова, до установления иерархических зависимостей между ними. От способов накопления промежуточной информации до требуемого интерфейса пользователя.

Структура определяет план построения пользовательского интерфейса, учитывающий присутствие требуемых окон и допустимую последовательность их смены.

Для каждого узла структуры формулируем описание входных и выходных данных. Например, структурный уровень «Раскладка» можно представить, как множество размещенных объектов и узнать их атрибуты. А для задачи построения маршрута увидеть ряд технологических требований, без которых геометрическая реализация теряет смысл. Для узлов, имеющих входные и выходные данные, сформулировать алгоритм и его частные случаи, вытекающие из подробных свойств элемента структуры. На примере построения маршрута, наличие вложенного размещения требует начинать обработку с внутренней детали и далее, переходить к другим вложенным, даже если это противоречит кратчайшему пути. Решение находится путем дальнейшей классификации: претенденты распределяются на подгруппы, обладающие одинаковыми свойствами. И уже для каждой подгруппы вызывать соответствующий алгоритм.

Построенная структура позволяет разделить глобальные задачи на множество подзадач, существование которых полностью определяется технологическими требованиями. К каждой из них применяется поиск существующего алгоритма. Или формулируется постановка модифицированного алгоритма, учитывающего технологические ограничения. В качестве примера можно привести модуль построения траектории совмещенного реза. На первый взгляд, для решения этой задачи подходит идея использования свойств Эйлерового графа. Это так. Но технология снова диктует свои ограничения. Даже в простейшем случае для обработки двух касающихся прямоугольников можно предложить несколько решений. В одном случае предпочтительней будет схема с начальным совмещенным движением, а в другом – классическая «восьмерка». На помощь снова приходит структура, именно она позволяет разделить эти задачи, выявить технологические ограничения, предъявить требования к алгоритмам, обозначить их место в системе.

Изложенные принципы использованы при построении систем автоматизированного построения раскроя «Интех-Р» и «Интех-Раскрой».

Список использованных источников: **1.** *Кремнев Г.П., Коновалов И.П., и др*. Прогрессивные методы получения заготовок из листового проката в машиностроении (Кремнев Г.П., Коновалов И.П., Наддачин В.Б., Коновалова Л.В., Дикаева В.Н.) Уч. пособие.- Одесса: Печатный дом. 2016.- 48 с**. 2.** *Некрасов Е.Н.* Компьютерные технологии в машиностроении. Одесса, Наука и Техника, 2005. -164 с. **3.** *Старец А.С., Чесноков В. В.* Принципы определения структуры технологических процессов при автоматизированном проектировании. Информ. листок ОЦНТИ. - Одесса, 1984. – 4 с. **4.** *Старец А.С. и др*. Повышение гибкости производства за счет автоматизации технологического проектирования. Сер. ХМ-15. Обзорная информация. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1985. - 36 с. **5.** *Коновалов И.* Раскрой - это очень просто! //САПР и Графика, №11, 2002. - С. 36-39. **6.** *Коновалов И., Рыбка А.* Технологическая картография. Раскрой листовых материалов в машиностроении. //Деньги и Технологии, №2, 2003. – С. 40-43. **7.** *Коновалов И.П., Мороз А.Г.* Эффективные методы технологической подготовки заготовительного производства. // Мир Техники и Технологий №5, 2007. – С. 36-38. **8.** *Коновалов И.П.* САПР «Интех-Раскрой» в развитии. Профессиональные решения для листообработки. // Оборудование и инструмент для профессионалов, №6, 2012. – 18 с. **9.** *Коновалов И.П.* Интех-Раскрой-Команда. // Оборудование и инструмент для профессионалов, №5, 2014. – 82 с.

Bibliography (transliterated): **1.** *Kremnev G.P., Konovalov I.P.,* i dr. Progressivnye metody poluchenija zagotovok iz listovogo prokata v mashinostroenii *(Kremnev G.P., Konovalov I.P., Naddachin V.B., Konovalova L.V., Dikaeva V.N.*) Uch. posobie.- Odessa: Pechatnyj dom. 2016.- 48 s. **2.** *Nekrasov E.N*. Komp'juternye tehnologii v mashinostroenii. Odessa, Nauka i Tehnika, 2005. -164 s. **3.** *Starets A.S., Chesnokov V. V*. Principy opredelenija struktury tehnologicheskih processov pri avtomatizirovannom proektirovanii. Inform. listok OCNTI. - Odessa, 1984. – 4 s. **4.** *Starets A.S. i dr*. Povyshenie gibkosti proizvodstva za schet avtomatizacii tehnologicheskogo proektirovanija. Ser. HM-15. Obzornaja informacija. M.: CINTIhimneftemash, 1985. - 36 s. **5.** *Konovalov I*. Raskroj - jeto ochen' prosto! //SAPR i Grafika, №11, 2002. - S. 36-39. **6.** *Konovalov I., Rybka A.* Tehnologicheskaja kartografija. Raskroj listovyh materialov v mashinostroenii. //Den'gi i Tehnologii, №2, 2003. - S. 40-43. **7.** *Konovalov I.P., Moroz A.G*. Jeffektivnye metody tehnologicheskoj podgotovki zagotovitel'nogo proizvodstva. // Mir Tehniki i Tehnologij №5, 2007. - S. 36-38. **8.** *Konovalov I.P*. SAPR «Inteh-Raskroj» v razvitii. Professional'nye reshenija dlja listoobrabotki. // Oborudovanie i instrument dlja professionalov, №6, 2012. – 18 s. **9**. *Konovalov I.P*. Inteh-Raskroj-Komanda. // Oborudovanie i instrument dlja professionalov, №5, 2014. – 82 s.

УДК [539.4.012+539.3]:616.728.2-77

Д.В. КРИВОРУЧКО, д-р техн. наук, Суми,
С.В. СОХАНЬ, д-р техн. наук, Київ,
С.П. ХОЛЯВКА, Суми,
С.С. ЄМЕЛЬЯНЕНКО, канд. техн. наук, Суми,
Н.О. МЕЛЬНІК-КАГЛЯК, Київ, Україна

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДВОШАРОВОЇ ГОЛОВКИ ЕНДОПРОТЕЗУ КУЛЬШОВОГО СУГЛОБУ ЛЮДИНИ

Ендопротези кульшового суглобу являють собою шарнір, який використовується в медицині для заміни зношених або пошкоджених суглобів. Однак дотепер існує проблема забезпечення їх довготривалої експлуатації, яка залежить від зносостійкості несучих поверхонь шарнірного з'єднання. Все це потребує вдосконалення конструкцій суглобів для кращого використання можливостей застосовуваних матеріалів, а вибір конструктивних параметрів має здійснюватися з аналізу напружено-деформованого стану конструкції. Для вирішення даної задачі ідеально підходить комп'ютерне моделювання методом скінчених елементів. У даній роботі представлено результати аналізу напружено-деформованого стану двошарової головки у рухомому з'єднанні ендопротезу кульшового суглобу. Технологія виготовлення кульшової головки ендопротезу не менш як із двох шарів передбачає поєднання зовнішньої зносостійкої сапфірової або керамічної оболонки відносно малої товщини з пластичною серцевиною з металу. Методом скінчених елементів розрахований напружено-деформований стан двошарової головки кульшового суглобу з урахуванням особливостей матеріалів ендопротезу та фізіології людини. Визначені параметри, які найбільше впливають на навантажувальну здатність конструкції ендопротезу кульшового суглобу.

Ключові слова: сферична головка, титан, сапфір, міцність, коефіцієнт запасу міцності, концентратор напружень

Эндопротезы тазобедренного сустава представляют собой шарнир, который используется в медицине для замены изношенных или поврежденных суставов. Однако до сих пор существует проблема обеспечения их долговременной эксплуатации, которая зависит от износостойкости несущих поверхностей шарнирного соединения. Это требует совершенствования конструкций суставов для лучшего использования возможностей применяемых материалов. Выбор конструктивных параметров должен осуществляться на основе анализа напряженно-деформированного состояния конструкции. Для решения данной задачи идеально подходит компьютерное моделирование методом конечных элементов.В данной работе представлены результаты анализа напряженно-деформированного состояния двухслойной головки в подвижном соединении эндопротеза тазобедренного сустава. Технология изготовления вертлужной головки эндопротеза не менее чем из двух слоев предусматривает сочетание внешней износостойкой сапфировой или керамической оболочки относительно малой толщины с пластической сердцевиной из металла. Методом конечных элементов рассчитано напряженно-деформированное состояние двухслойной головки тазобедренного сустава с учетом особенностей материалов эндопротеза и физиологии человека. Определены параметры, которые более всего влияют на нагрузочную способность конструкции эндопротеза тазобедренного сустава.

Ключевые слова: сферическая головка, титан, сапфир, прочность, коэффициент запаса прочности, концентратор напряжений

© Д.В. Криворучко, С.В. Сохань, С.П. Холявка, С.С. Ємельяненко, Н.О. Мельнік-Кагляк, 2016

The modern medicine uses hip joint implants for replacing worn or damaged real joints. However, there is still the problem of the life of the implants, which depends on the durability of swivel bearing surfaces. This requires improving the design of the joints for better utilization of material properties. The design parameters should be chosen based on structural analysis of the joint. Finite element analysis is the best method to do this.This paper presents structural analysis of two-layer head in movable hip joint. Manufacturing techniques of two-layer endoprosthesis hip heads provides a combination of outer wear-resistant sapphire or ceramic layer with relatively small thickness and plastic core metal. Finite element structural analysis determines deformation, strain and stress in two-layer endoprosthesis hip head taking into account material properties and human physiology. The paper shows the parameters that have the most influence on load capacity of the joint.
Keywords: spherical head, titanium, sapphire, strength, safety factor, stress concentration

1. ВСТУП

Операція тотального ендопротезування суглобу людини, тобто його заміни штучним, є однією з найбільш ефективних хірургічних операцій сучасної медицини, що практично повністю відновлює здоров'я і працездатність пацієнтів на десятки років.

Статистика різних країн світу свідчить, що в середньому протезування суглобів потребують 500-1000 хворих та травмованих на 1 млн. населення щорічно. Проблема є актуальною і для України, оскільки сьогодні кількість операцій заміни суглобів, що виконується в нашій країні, є в 10 разів меншою за необхідну [1-4]. Це пов'язано з низкою негативних факторів, в тому числі недостатнім технічним і матеріальним оснащенням обласних центрів по ендопротезуванню суглобів людини [2].

У зв'язку з розширенням показань до операцій тотального ендопротезування кульшового суглоба все більш складних хворих важливим являється вдосконалення конструкцій штучних суглобів [5]. При цьому дотепер існує проблема забезпечення їх довготривалої експлуатації. Основні причини: недостатня біологічна сумісність застосовуваних матеріалів, нестабільність функціонування (через зношування) рухомого шарнірного з'єднання, або пари тертя ендопротезу (термін, звичайно вживаний спеціалістами з протезування суглобів), і як наслідок, асептична нестабільність (набута рухомість) фіксуючих компонентів ендопротеза в опорно-рухомому апараті людини. Отже довговічність штучного суглобу визначається насамперед зносостійкістю несучих поверхонь рухомого з'єднання.

Рухоме з'єднання ендопротезу кульшового суглобу людини утворюють опукла сферична поверхня кульшової головки, виконаної з металу або оксидної кераміки, й також сферична западина вкладишу ацетабулярної чаші, виготовленого з поліетилену з високим ступенем поперечних зв'язків, металу або кераміки.

Посадка кульшової головки на конус ніжки, кут якого забезпечує нерухоме з'єднання на конусі за рахунок сил тертя (конус Морзе), дозволяє хірургові вибирати шарнірні пари, що краще відповідають вимогам конкретного пацієнта, тому що металева або керамічна головки можуть бути встановлені в парі із вкладишами з поліетилену, металу, або кераміки.

Завдання підвищення зносостійкості несучих поверхонь вирішують виготовленням головки ендопротезу не з металу, а з сапфіру або полікристалічних корунду чи діоксиду цирконію, які мають перевагу у зносостійкості й біологічній сумісності. Однак недоліком застосування цих матеріалів є обмеження, пов'язані з недостатньою тріщиностійкістю й міцністю. Зняти їх дозволяє технологія виготовлення головки кульшового ендопротезу не менш як із двох шарів, в якій зносостійка сапфірова або керамічна оболонка відносно малої товщини поєднана з пластичною серцевиною з металу. Така технологія передбачає отримання зносостійкої оболонки з сапфіру або кераміки шліфуванням й наступне заповнення її порожнини металом, в якому в подальшому виконується конусний посадковий отвір. В такій головці модульний принцип приєднання до ніжки ендопротеза реалізується на базі посадкового з'єднання метал-метал, а не кераміка-метал, що усуває вказані вище обмеження із застосування неметалевих матеріалів і таким чином сприяє підвищенню довговічності ендопротеза в цілому.

Для реалізації цієї ідеї необхідно вирішити задачу визначення конструктивних параметрів двошарової головки, виходячи з фізико-механічних властивостей матеріалів, що застосовуються, а також умов контактної взаємодії головки у, по-перше, рухомому з'єднанні з вкладишем ацетабулярної чаші, і по-друге, нерухомому посадковому з'єднанні з конусом ніжки під дією сил, що виникають під час руху людини.

Задача може бути вирішена шляхом аналізу напружено-деформованого стану такої головки за допомогою методу скінчених елементів. Цей метод вже успішно застосовувався для аналізу міцності рухомих з'єднань ендопротезів [6-11], але для багатошарових головок ця задача не вирішувалася.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Метою роботи є аналіз за допомогою методу скінчених елементів напружено-деформованого стану головки ендопротезу кульшового суглобу, в якій зносостійка оболонка відносно малої товщини поєднана з пластичною серцевиною з металу, і визначення параметрів конструкції такої головки.

Особливістю функціонування головки ендопротезу кульшового суглобу, в тому числі двошарової, є те, що вона затиснута між іншими компонентами ендопротезу – вкладишем ацетабулярної чаші з одного боку й конусом ніжки ендопротезу з іншого (рис. 1). Головка та ніжка орієнтовані по відношенню до вкладиша під кутом 45°, виходячи з особливостей будови скелета людини та фізіологічних особливостей людини при пересуванні. Значення зовнішнього діаметру головки, показане на рис. 1, взяте з ряду стандартних типорозмірів і є найбільш вживаним у теперішній час.

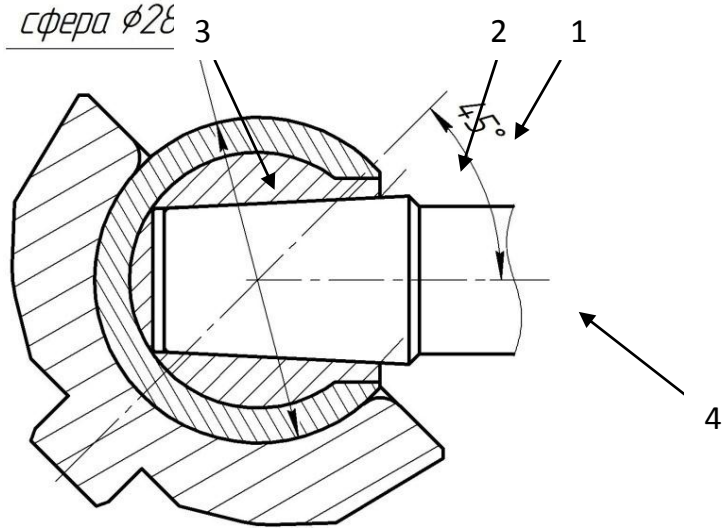


Рисунок 1 – Схема розташування елементів
досліджуваної частини ендопротезу кульшового суглобу:
двошарова головка (сферична оболонка з сапфіру – 1, серцевина з титану – 2),
вкладиш ацетабулярної чаші – 3, посадковий конус ніжки – 4

Зовнішня поверхня головки виконана сферичною з обов'язковим відхиленнями діаметру від номінального розміру в "мінус", а впадина вкладиша виконана сферичною з обов'язковим відхиленнями діаметру від номінального розміру навпаки в "плюс". В дослідженні прийнято, що відхилення зовнішнього діаметра головки від номінального розміру допускаються в межах від 0 до -0,05 мм, а внутрішнього діаметра вкладиша – в межах від +0,07 до +0,02 мм. Таким чином величина зазору у парі тертя сапфір-сапфір може складати від 0,02 до 0,12 мм.

Кут посадкового конусу ніжки співпадає з кутом конусу посадкового отвору головки. Зазор між торцями посадкового конусу ніжки і посадкового отвору головки виконаний конструктивно з урахуванням того, що головка базується на посадковому конусі ніжки тільки зовнішньою конічною поверхнею. урахуванням конструкції головки.

Розглянемо випадок, коли силове навантаження діє в площині *XY* (рис. 2), а обертання голівки має місце переважно відносно осі *Z*. В цьому випадку задача є симетричним відносно площини *XY*. У зв'язку з цим може бути розглянуто лише ½ частину тіл системи. Оскільки чаша не приймає безпосередньої участі в навантаженні головки, то в дослідженні вона не розглядалася. Таким чином дослідження проводилися за 3D-моделлю

суглоба, симетричною відносно площини *XY* (рис. 2).

Дослідження проводилося за допомогою програмного забезпечення ANSYS 14.5.7. Скінчено-елементна сітка була побудована з призматичних скінчених елементів, що забезпечило підвищену точність розрахунків (рис. 3).

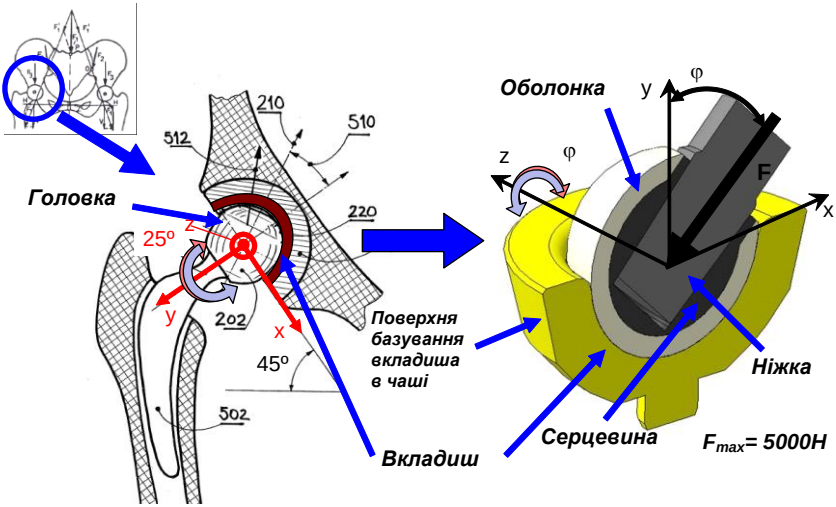


Рисунок 2 – Розрахункова схема дії сил у досліджуваній частині ендопротезу

Матеріали елементів досліджуваної частини ендопротезу, їх фізико-механічні характеристики наведені у табл. 1. Зовнішня оболонка головки, вкладиш ацетабулярної чаші ендопротезу виконані з сапфіру, серцевина головки та ніжка – з титанового сплаву. Сапфір проявляє анізотропію механічних властивостей, але спираючись на попередні дослідження авторів, котрі показали незначний вплив цього ефект [11], в дослідженні прийнято припущення про ізотропність механічних властивостей деталей, виготовлених з сапфіру.

Перша контактна пара – це нерухоме з'єднання посадковий конус ніжки-посадковий отвір у серцевині головки. Матеріал цих елементів – титан. Коефіцієнт тертя між контактними поверхнями прийнятий за 0,1. Кути конусного отвору головки і посадкового конуса ніжки прийняті однаковими. Друга контактна пара – це рухоме з'єднання вкладиш ацетабулярної чаші-сферична оболонка головки. Матеріал цих елементів – сапфір. Коефіцієнт тертя між контактними поверхнями прийнятий за 0,01. Номінальні радіуси сфер вкладиша і головки прийняті однаковими. Тип контактної взаємодії вказаних контактних пар – фрикційний.

Таблиця 1 – Фізико-механічні характеристики матеріалів

№ елемента	Найменування елемента	Матеріал елемента	Густина , кг/м^3	Модуль пружності, ГПа	Коефіцієнт Пуасона	Границя міцності при розтягуванні $\sigma_в$, МПа	Границя текучості $\sigma_т$, МПа	Коефіцієнт тертя	Джерело
1	Вкладиш	Сапфір	3992	400	0,3	250	250	0,01	[15]
2	Оболонка	Сапфір	3992	400	0,3	250	250		[15]
3	Серцевина	Титан ВТ1-0	4500	115	0,3	345	250	0,1	[16]
4	Ніжка	Титановий сплав ВТ3-1	4500	115	0,3	1040	1015		[16]

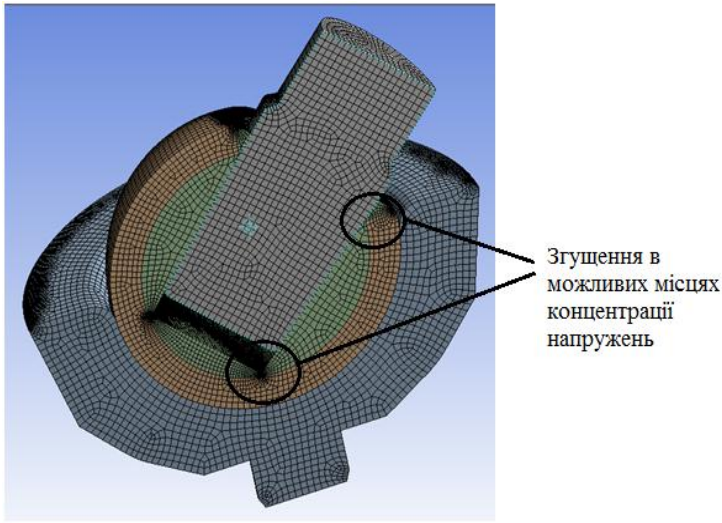


Рисунок 3 – Скінчено-елементна сітка 3D-моделі та місця згущення сітки

Головка може виконувати обертальний рух відносно вкладиша в площині *XY*. Кут повороту φ складає ±45° (рис. 2). На суглоб діє сила маси тіла *F* людини, яка змінюється в часі. Сила *F* діє в площині симетрії вкладиша

(рис. 2). Кут φ прийнятий рівними 45°. При екстремальному навантаженні (біг, стрибки) максимальна стискаюча сила досягає 5-8 мас тіла, що може бути прийнято за базове навантаження при розрахунку в цій роботі. Тому приймаємо F_{max}=5000Н [12].

Вкладиш защемляється по конусному зовнішньому ободку у посадочному пояску чаші (рис. 2) і жорстко не зв'язаний з нею. Чаша нерухомо фіксується в кісткову тканину і обростає нею, тобто жорстко зв'язана з нею.

Для виконання умов симетричності позбавили переміщення всіх тіл 3D-моделі накладенням обмежень по площині симетрії XY в напрямку, перпендикулярному цій площині.

Попередня експертна оцінка виявила три фактори, які потенційно можуть впливати на міцність елементів ендопротезу: зазор між вкладишем та головкою, довжина конусу посадкового отвору, товщина оболонки. Для виявлення цього впливу в дослідженні проведено розрахунковий експеримент, в якому кожен з факторів варіювався незалежно від інших (табл. 2).

Міцність деталей з сапфіру оцінювалася за найбільшими головними напруженнями, а міцність деталей з титанових сплавів – за еквівалентними напруженнями по фон Мізесу.

Таблиця 2 – План розрахункового експерименту

№	Змінювані фактори	Числові значення факторів, мм				
1.	Зазор між вкладишем та головкою	0,02	0,04	0,06	0,09	0,12
2.	Товщина сапфірової оболонки	2,0	2,25	2,5	2,75	3,0
3.	Довжина конусу посадкового отвору	16,5	17,0	17,5	18,0	18,5

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Загальною тенденцією напружено-деформованого стану елементів досліджуваної частини ендопротезу є зростання напружень зі збільшенням навантаження (рис. 4 та рис. 5). Причому найбільш навантаженими є елементи двошарової головки – сапфірова оболонка і її серцевина з титану. В них напруження зростають майже пропорційно силі навантаження (рис. 6). З рисунку 6б видно, що при великих навантаженнях напруження у вкладишу наближаються до 80МПа.

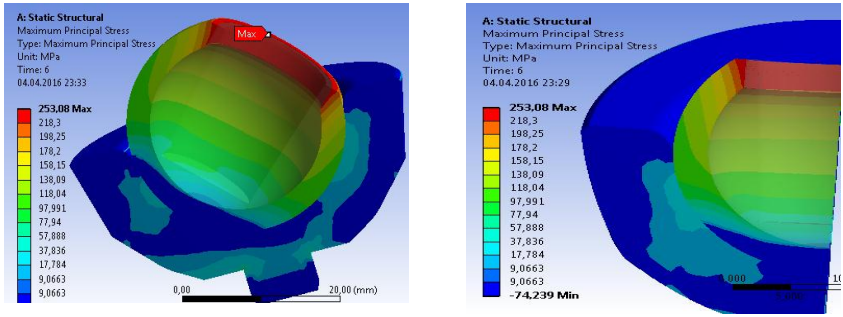


Рисунок 4 – Максимальне головне напруження в елементах, виготовлених з сапфіру

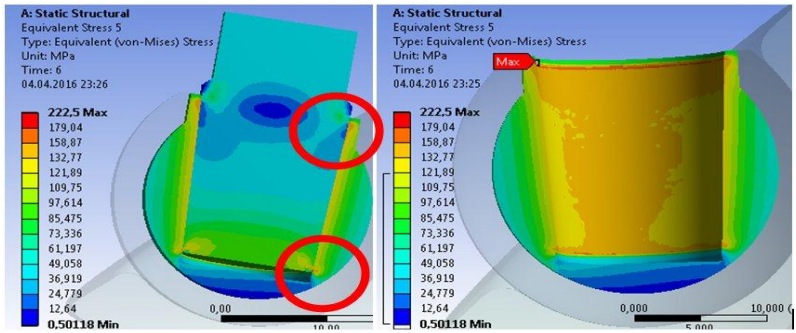
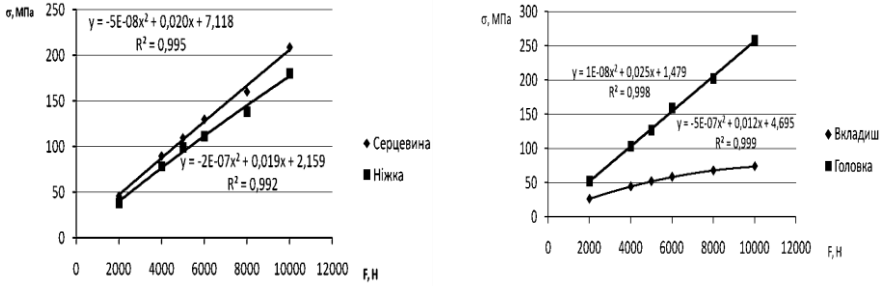


Рисунок 5 – Еквівалентне напруження в елементах, виготовлених з титану



а) б)

Рисунок 6 – Вплив навантаження на напруження в елементах з: титану – а, сапфіру – б

Максимальне еквівалентне напруження по фон Мізесу виникає в зоні контакту найменшого діаметра ніжки і становить при номінальних значеннях факторів 223 МПа (рис. 5). Досить великі напруження виникають в зоні контакту ніжки з серцевиною в нижній її частині. Це пов'язано з деформацією серцевини і ніжки при навантаженні в умовах концентрації напружень. Максимальне головне напруження виникає в оболонці зоні переходу конічної поверхні в дно посадкового отвору і становить 253 МПа (рис. 4).

Зі збільшенням зазору у з'єднанні між вкладишем та головкою напруження зростають, причому найбільші напруження виникають у оболонці головки (рис. 7 та рис. 8) оскільки зі збільшенням зазору значно зменшується площа контакту між головкою та вкладишем.

Максимальне головне напруження у вкладиші виникає в екваторіальній області. В результаті деформації діаметр вкладишу зменшується. В результаті головка виявляється затисненою в зоні, шириною близькою до ширини конусного обідка (рис. 10).

Товщина сапфірової оболонки найбільше впливає на навантажувальну здатність ендопротезу. Зі збільшенням товщини оболонки значно зменшуються напруження (на 14-15% при зміні товщини від 2 до 3 мм), як у сапфіровому, так і у титановому шарі головки (рис. 9 та рис. 10).

Зі збільшенням довжини конусу посадкового отвору напруження зменшуються в небезпечних місцях на 9-10%. Найбільше таке зменшення напружень спостерігається у сапфіровій оболонці (рис. 11 та рис. 12).

Коефіцієнт запасу міцності по першій теорії міцності отримано для максимального навантаження в конструкції з номінальними розмірами на рівні 2,13 (рис. 13). Це означає, що конструкція працездатна і може витримувати задане навантаження.

Мінімальний коефіцієнт запасу міцності по четвертій теорії міцності для титанових деталей склав 2,57 на поверхні контакту (рис. 14). Він обумовлений переміщенням ніжки в ендопротезі під дією сили навантаження через те, що в осьовому напрямку між торцями конусу ніжки і отвору головки наявний зазор.

Зменшуючи зазор, збільшуючи товщину сапфірової оболонки та довжину конусу можливо забезпечити збільшення навантажувальної здатності ендопротезу суглоба розглянутої конструкції. Разом з тим межі цієї зміни обмежені сучасними технологічними можливостями і повинні бути визначені в окремому дослідженні.

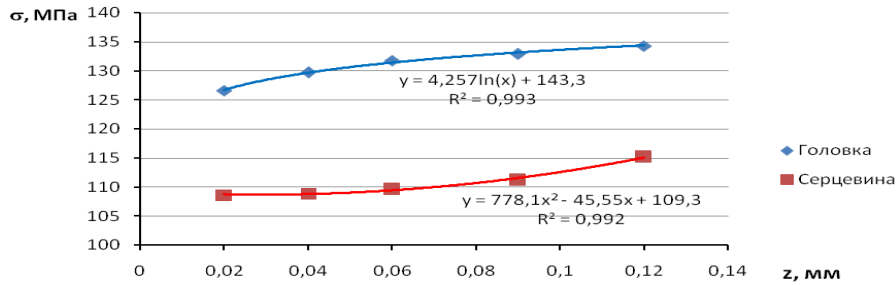


Рисунок 7 – Вплив зазору на напруження в елементах:
– з титану, – з сапфіру

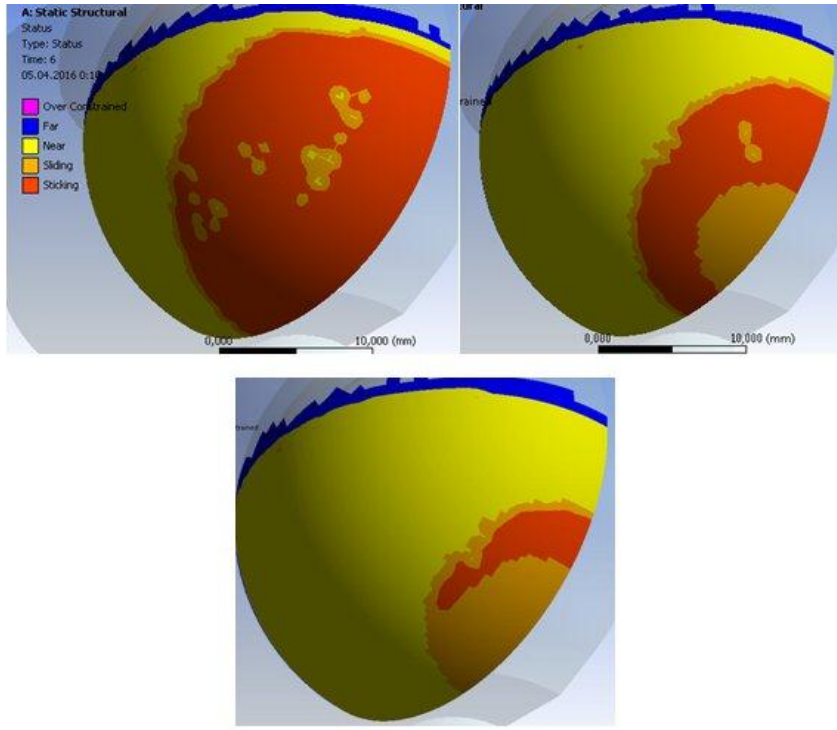


Рисунок 8 – Вплив зазору на площу контакту головки та вкладиша

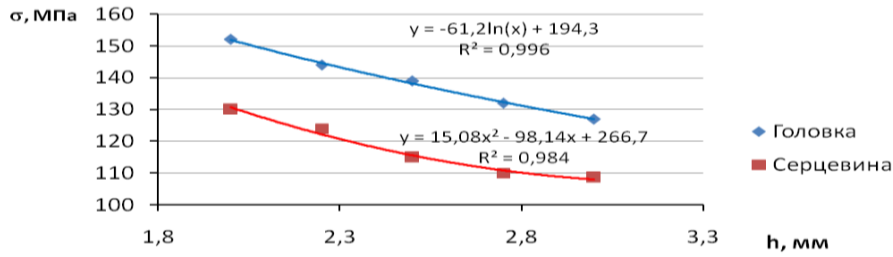


Рисунок 9 – Вплив товщини сапфірової оболонки на напруження в елементах:
■ – з титану, ◆ – з сапфіру

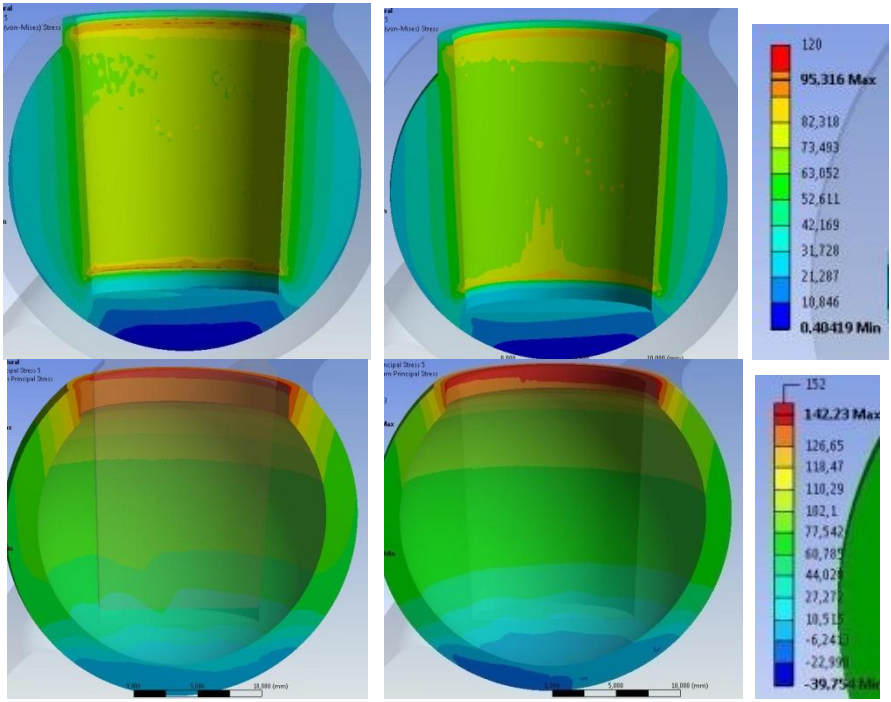


Рисунок 10 – Вплив товщини сапфірової оболонки на напруження в головці

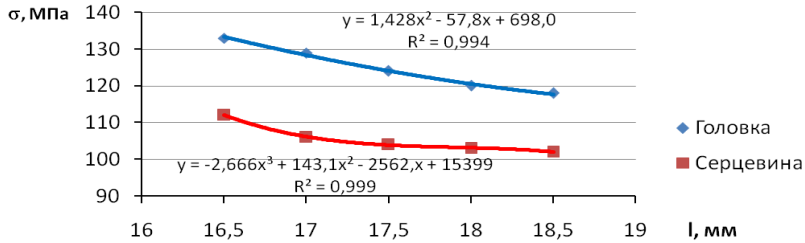


Рисунок 11 – Вплив довжини посадки конуса на напруження в елементах:
– з титану, – з сапфіру

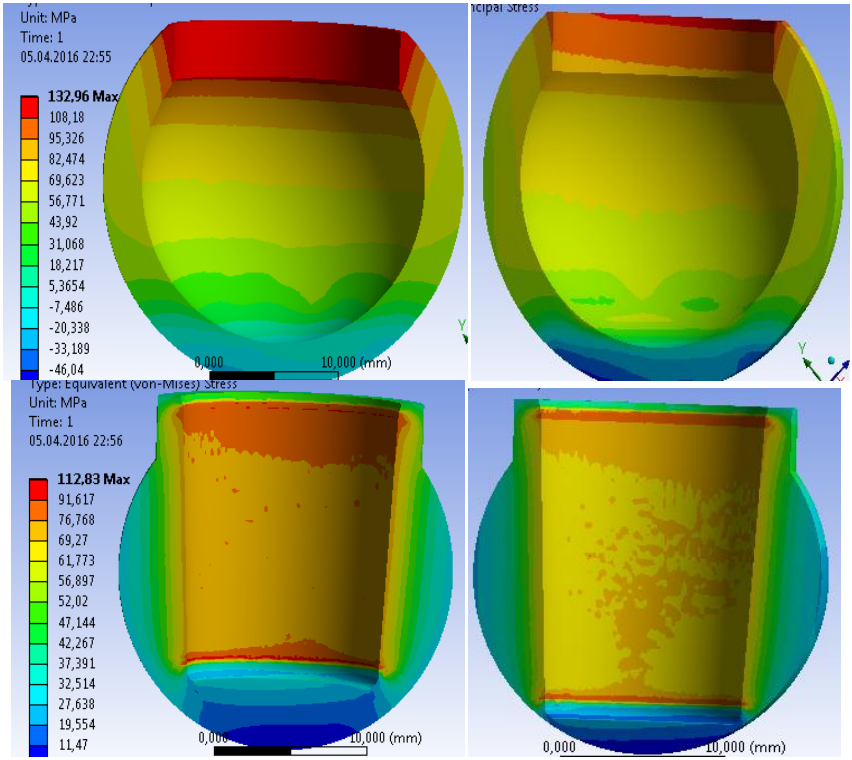


Рисунок 12 – Розподіл напружень при збільшенні довжини посадки конусу посадкового отвору

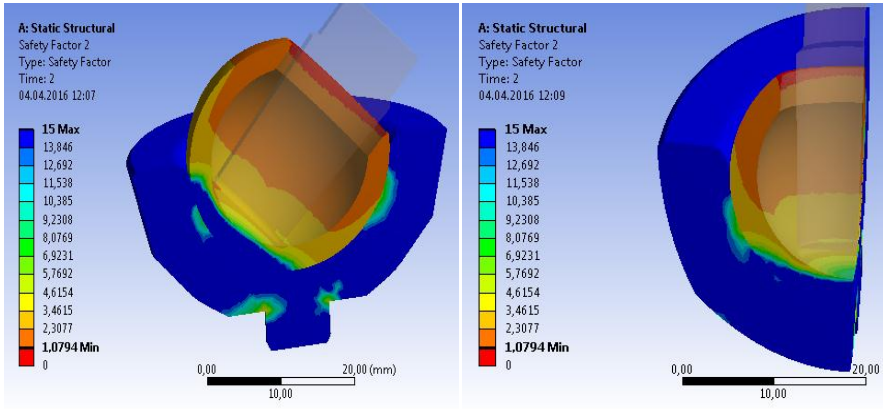


Рисунок 13 – Коефіцієнт запасу по першій теорії міцності для елементів, виготовлених з сапфіру

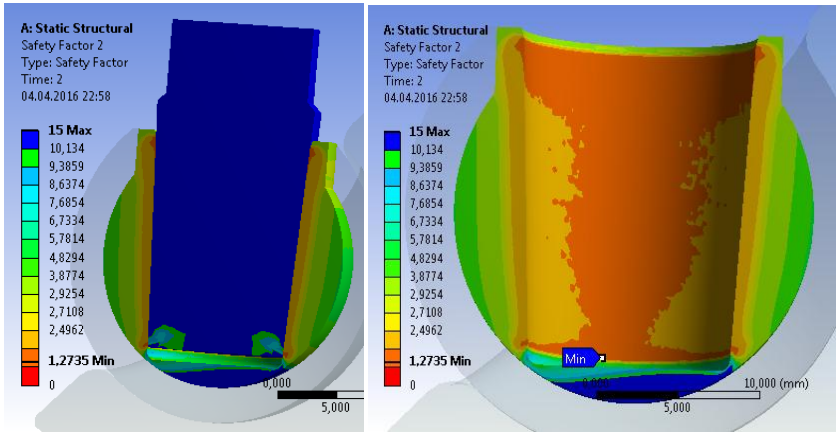


Рисунок 14 – Коефіцієнт запасу міцності по четвертій теорії міцності для елементів з титану

4. ВИСНОВКИ

Дослідження напружено-деформованого стану двоошарової головки ендопротезу кульшового суглобу, яке проведено методом скінчених елементів у програмі ANSYS 14.5.7, показало, що найбільші напруження виникають у сапфіровому шарі головки у її верхній частині та на контактній поверхні титанового шару головки.

Основними найбільш впливовими конструктивними факторами на навантажувальну здатність ендопротезу є товщина головки, зазор між вкладишем та головкою, довжина конусу посадкового отвору, кут конусу посадкового отвору. Товщина сапфірової оболонки головки є найбільш впливовим фактором з усіх названих. Дослідження показало, що товщина оболонки в межах 2-3 мм забезпечує міцність головки з коефіцієнтом запасу більше 2.

Список використаних джерел: 1. *Маслов А. П.* К вопросу эндопротезирования тазобедренного сустава //Ортопед., травматол. и протезир. - 2008. - № 2. - С. 10-14. **2.***Корж Н. А., Филиппенко В. А., Танъкут В. А.* Проблема эндопротезирования суставов в Украине и пути ее решения // Ортопед., травматол. и протезир. - 2008. № 2. - С. 5-9. **3.***Филиппенко В. А., Танькут А. В.*Эволюция проблемы эндопротезирования суставов // Международный медицинский журнал.-2009.- № 1 (57). - С. 70-74. **4.***Герасименко С. І., Полулях М. В., Герасименко А. С.* Комплексне ортопедичне лікування хворих на ревматичний артрит // Мат. Всеукраїн. наук.-практ. конф. з мівжнародною участю, присвяченої 90-річчю ДУ "Інститут травматологи та ортопедії. – К:, 2009. - С. 40. **5.***Рибачук О. И.* Ошибки и осложнения при тотальном эндопротезировании тазобедренного сустава//Ортопед., трамвматол. и протезир. – 1997. – №2. – С.13-19. **6.***Банецкий М. В.* Биомеханическое обоснование использования вертлужного компонента при эндопротезировании. **7.** *Weber W, Zahner M., Rieger W.* Improvement of reliability of ceramic hip joints // Eur. Cells Materials. - 2002. – 36(11). - P. 16-17. **8.***Cilingira A.C., Ucara V, Udofiab I. J., JinbBiphasic Z. M.* Finite element modelling of contact mechanics of hemi of human hip joint. Part II: Polycarbonateurethane on cartilage contact // Trends Biomater. Artif. Organs. - 2008. - 22(2). - P. 61-68.**9.***Todo M., Takahashi Y., Nagamine R.* Stress Analysis of Artificial Knee Joints under Flexionand Rotation // TribologyOnline. - 2008. - 3(3). - P. 211-215. **10.***Михайлов О. В., Ткаченко Л. Н., Штерн М. Б. и др.* Компьютерное моделирование напряжений в керамической головке эндопротеза тазобедренного сустава // Вісник ортопед., травматол. та протезув. - 2006. - № 1. - С. 43- 47. **11.***Новиков Н. В.* Эндопротезы суставов человека: материалы и технологии: Монография / Под. ред. Н. В. Новикова, О. А. Розенберга, Й. Гавлика. – Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – 528 с. **12.***Kuster M. S., Gachter A., Wood G. A., Stachowiak G. W.* Joint loads considerations into total knee replacement. – 1997 – 1. - P.109-113. **13.***Рибачук О. И.* Ошибки и осложнения при тотальном эндопротезировании тазобедренного сустава//Ортопед., трамвматол. и протезир. – 1997. – №2. – С.13-19. **14.***Левадный Е.В., Нуштаев Д.В.*, Компьютерное моделирование поведения ножки бедренного компонента при эндопротезировании тазобедренно госустава.**15.***Шевченко А.В. и др.* Биоинертные имплантанты на основе нанокристаллических порошков ZrO_2 // Техника машиностроения.– № 2 (58).– 2006.– С.32–35.**16.** *Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.* Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: Наук. думка,1988.–736 с.

Bibliography (transliterted): 1. *Maslov A. P.* K voprosu jendoprotezirovanija tazobedrennogo sustava //Ortoped., travmatol. i protezir. - 2008. - № 2. - S. 10-14. **2.***Korzh N. A., Filippenko V. A., Tankut V. A.* Problema jendoprotezirovanija sustavov v Ukraine i puti ee reshenija // Ortoped., travmatol. i protezir. - 2008. № 2. - S. 5-9. **3.** *Filippenko V. A., Tan'kut* A. V.Jevoljucija problemy jendoprotezirovanija sustavov // Mezhdunarodnyj medicinskij zhurnal.-2009.- № 1 (57). - S. 70-74. **4.***Gerasimenko S. I.,* Poluljah M. V., Gerasimenko A. S. Kompleksne ortopedichne likuvannja hvorih na revmatichnij artrit // Mat. Vseukraïn. nauk.-prakt. konf. z mivzhnarodnoju uchastju, prisvjachenoï 90-richchju DU "Institut travmatologi ta ortopediï. – K:, 2009. - S. 40. **5.***Ribachuk O. I.* Oshibki i oslozhnenija pri total'nom jendoprotezirovanii tazobedrennogo sustava//Ortoped., tramvmatol. i protezir. – 1997. – №2. – S.13-19. **6.** *Baneckij M. V.* Biomehanicheskoe obosnovanie ispol'zovanija vertluzhnogo komponenta pri jendoprotezirovanii. **7.** *Weber W, Zahner M., Rieger W.* Improvement of reliability of ceramic hip joints // Eur. Cells Materials. - 2002. – 36(11). - P. 16-17. **8.** *Cilingira A.C., Ucara V, Udofiab I. J., JinbBiphasic Z. M.* Finite element modelling of contact mechanics of hemi of human hip joint. Part II: Polycarbonateurethane on cartilage contact // Trends Biomater. Artif. Organs. - 2008. - 22(2). - P. 61-

68.**9.** *Todo M., Takahashi Y., Nagamine R.* Stress Analysis of Artificial Knee Joints under Flexionand Rotation // TribologyOnline. - 2008. - 3(3). - P. 211-*215.* **10.***Mihajlov O. V., Tkachenko L. N., Shtern M. B.* i dr. Komp'juternoe modelirovanie naprjazhenij v keramicheskoj golovke jendoproteza tazobedrennogo sustava // Bicnik ortoped., travmatol. ta protezuv. - 2006. - № 1. - S. 43- 47. **11.** Novikov N. V. Jendoprotezy sustavov cheloveka: materialy i tehnologii: *Monografija / Pod. red. N. V. Novikova, O. A. Rozenberga, J. Gavlika*. – Kiev: ISM im. V. N. Bakulja NAN Ukrainy, 2011. – 528 s. **12.** *Kuster M. S., Gachter A., Wood G. A., Stachowiak G. W*. Joint loads considerations into total knee replacement. – 1997 – 1. - P.109-113. **13.** Ribachuk O. I. Oshibki i oslozhnenija pri total'nom jendoprotezirovanii tazobedrennogo sustava//Ortoped., tramvmatol. i protezir. – 1997. – №2. – S.13-19. **14.** *Levadnyj E.V., Nushtaev D.V.*, Komp'juternoe modelirovanie povedenija nozhki bedrennogo komponenta pri jendoprotezirovanii tazobedrenno gosustava.**15.** *Shevchenko A.V.* i dr. Bioinertnye implantanty na osnove nanokristallicheskih poroshkov ZrO2 // Tehnika mashinostroenija.– № 2 (58).– 2006.– *S.32–35.***16.** *Pisarenko G.S., Jakovlev A.P., Matveev V.V.* Spravochnik po soprotivleniju materialov. – Kiev: Nauk. dumka,1988.–736 s.

УДК 621.923.1

Н.В. ЛИЩЕНКО, канд. техн. наук, Одесса, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗУБОШЛИФОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ЭВОЛЬВЕНТЫ

На підставі отриманого аналітичного рівняння евольвентного профілю розроблено методику визначення активної ширини еквівалентного прямокутного профілю шліфувального круга, виходячи з рівності знімання матеріалу прямокутним і евольвентним профілем. Це дозволило визначати параметри, що характеризують продуктивність профільного зубошліфування – інтенсивність шліфування і питому інтенсивність шліфування.
Ключові слова: зубошліфування, шліфувальний круг, аналітичне рівняння евольвенти

На основании полученного аналитического уравнения эвольвентного профиля разработана методика определения активной ширины эквивалентного прямоугольного профиля шлифовального круга, исходя из равенства съема материала прямоугольным и эвольвентным профилем. Это позволило определять параметры, характеризующие производительность профильного зубошлифования – интенсивность шлифования и удельную интенсивность шлифования.
Ключевые слова: зубошлифование, шлифовальный круг, аналитическое уравнение эвольвенты

On the basis of the involute profile analytical equation obtained a technique of determining the grinding wheel equivalent rectangular profile active width is developed by means of equality condition of material removal both by rectangular profile and involute one. This technique has allowed determining the parameters that characterize the profile gear grinding productivity – grinding intensity and a specific grinding intensity.
Keywords: gear grinding, grinding wheel, analytical equation of involute profile

1. Постановка проблемы. Было отмечено, что для оценки производительности и проектирования шлифовальной операции используется ряд характеристических величин, к числу которых относится, например, количество удаляемого в единицу времени материала (интенсивность шлифования) Q_w (в мм^3/с). В зарубежной литературе величину Q_w (в мм^3/с) дополнительно приводят к единице эффективной (далее активной) ширины шлифовального круга и обозначают Q'_w в мм^3/(с·мм). Однако для профильного эвольвентного зубошлифования отсутствуют методики определения этих показателей. В этой связи разработка методики определения показателей Q_w и Q'_w для эвольвентной формы профиля шлифовального круга, относится к числу актуальных задач технологии машиностроения.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Известен подход для определения интенсивности профильного шлифования по аналогии

© Н.В. Лищенко, 2016

с плоским прямоугольным шлифованием, т.е. с применением формулы для интенсивности Q плоского шлифования [1]

$$Q = 10^3 V_{snp}\, t_{\phi}\, S_{non}\ , \text{мм}^3/\text{с}, \tag{1}$$

где V_{snp} – скорость продольной подачи, м/мин; t_{ϕ} – подача на сторону (нормальная глубина резания), мм; S_{non} – поперечная подача, мм.

Отмечается, что величина S_{non} в данном случае является активной шириной профиля. Для профильного шлифования в качестве S_{non} используется «периметр в поперечном сечении шлифуемого контура в зоне контакта между кругом и заготовкой». Однако, периметр по общему определению является замкнутой линией. Поэтому термин «периметр в поперечном сечении» является некорректным.

Известен также другой подход к определению интенсивности шлифования Q через найденный предварительно удельный параметр Q'_w [2], т.е.

$$Q = 2 Q'_w\, L\,, \tag{2}$$

где Q'_w – объем удаляемого материала за единицу времени в расчёте на единицу активной ширины шлифовального круга, мм^3/(мм·с); L – активная ширина шлифовального круга (фактическая ширина контакта круга с заготовкой), мм.

При этом уточняется, что [2]

$$Q'_w = S_{вр\,на\,сторону}\, V_{прод}\ / 1000\,, \tag{3}$$

где $S_{вр\,на\,сторону}$ – подача на сторону, мм; $V_{прод}$ – скорость продольного перемещения шлифовального круга, м/с.

Однако формулы (2) и (3) написаны для частного случая – для эквидистантного припуска, который является постоянным в направлении перпендикуляра к профилю эвольвенты. Для многопроходного профильного шлифования методом копирования величина $S_{вр\,на\,сторону}$ является переменной, а постоянна она только на первом рабочем ходе, когда исходный профиль на заготовке перед зубошлифованием сформирован инструментом, имеющим другой профиль, обеспечивающий одинаковую подачу на сторону.

Таким образом, данные методики определения интенсивности профильного зубошлифования являются некорректными для профильного зубошлифования методом копирования.

3. Цель исследования заключается в разработке способа определения показателя Q'_w для любой произвольной формы профиля при профильном шлифовании по жёсткой схеме, например, при зубошлифовании методом копирования. Для этого необходимо определить площади сечения среза, которые однозначно характеризуют эти показатели.

4. Материалы исследований. Профиль зуба эвольвентного зубчатого колеса состоит из эвольвентного участка и переходной кривой во впадине зуба. Эвольвентой окружности называют плоскую кривую, которая описывается любой точкой производящей прямой при ее качении без скольжения по основной окружности радиуса r_b.

Уравнения эвольвенты в полярных координатах в параметрической форме имеют вид [3]:

$$\text{inv}\alpha_x = \Theta_x, \tag{4}$$

$$r_x = \frac{r_b}{\cos\alpha_x}. \tag{5}$$

Расчет профиля впадины зуба зубчатого колеса производится по следующим исходным данным: z – число зубьев; m – модуль; S_t – толщина зуба колеса по делительной окружности, мм; d_∂ – диаметр делительной окружности; d_a – диаметр окружности выступов, мм; d_b – диаметр основной окружности, мм; d_f – диаметр окружности впадин, мм.

Определение координат узловых точек эвольвентного профиля впадины зуба колеса проводят в системе *XOY*. Начало координат системы *XOY* помещают на оси зубчатого колеса. В качестве оси *OY* принимают ось симметрии впадины зуба зубчатого колеса. Известно, что координаты *X* и *Y* произвольной точки эвольвентного профиля впадины зуба описываются следующими уравнениями [3]

$$X = r_x \sin\delta_x, \tag{6}$$

$$Y = r_x \cos\delta_x, \tag{7}$$

где r_x – текущий радиус вектор произвольной точки эвольвентного профиля впадины зуба зубчатого колеса; δ_x – угол между линией, проходящей через ось симметрии впадины зубчатого колеса и линией, проходящей через центр зубчатого колеса и точкой эвольвентного профиля, определяемой радиусом r_x. Причем, радиус r_x необходимо выбирать в пределах $r_b < r_x < r_a$, где r_b – радиус основной окружности; r_a – радиус окружности выступов. В свою очередь

$$\delta_x = \delta_0 + \Theta_x \tag{8}$$

$$\Theta_x = \mathrm{tg}\alpha_x - \alpha_x . \tag{9}$$

Функция $\mathrm{tg}\alpha_x - \alpha_x$ обозначается $\mathrm{inv}\alpha_x$ и называется эвольвентной функцией. Причем

$$\alpha_x = \arccos\frac{r_b}{r_x}; \tag{10}$$

$$\delta_0 = \delta_\partial - \Theta_\partial , \tag{11}$$

где δ_∂ – угол для точки профиля впадины зуба, расположенной на делительной окружности.

Уравнение эвольвенты для точки, расположенной на делительной окружности [3]:

$$\Theta_\partial = \mathrm{inv}\,\alpha_\partial = \mathrm{tg}\alpha_\partial - \alpha_\partial , \tag{12}$$

$$\alpha_\partial = \arccos\frac{r_b}{r_\partial} , \tag{13}$$

$$\delta_\partial = \frac{T_\partial}{2r_\partial} , \tag{14}$$

где T_∂ – ширина впадины зуба на делительной окружности, мм; r_∂ – радиус делительной окружности, мм

При этом

$$T_\partial = \pi m - S_t , \tag{15}$$

где S_t – толщина зуба колеса по делительной окружности, мм.

В общем случае толщина зуба на заданном диаметре d_y определяется по формуле [4]

$$S_{ty} = d_y \left(\frac{\frac{\pi}{2} + 2 \cdot x \cdot \mathrm{tg}\alpha}{z} + \mathrm{inv}\,\alpha_t - \mathrm{inv}\,\alpha_y \right), \tag{16}$$

где x – коэффициент смещения; α – угол профиля зуба исходного контура в нормальном сечении; α_t – угол профиля зуба в торцовом сечении; α_y – угол профиля в точке на концентрической окружности заданного диаметра d_y. Кроме того,

$$\alpha_y = \arccos \frac{d_\partial}{d_y} \cdot \cos \alpha_t ; \tag{17}$$

$$\alpha_t = \mathrm{arctg} \frac{\mathrm{tg}\alpha}{\cos\beta} ; \tag{18}$$

$$\mathrm{inv}\,\alpha_t = \mathrm{tg}\alpha_t - \alpha_t ; \tag{19}$$

$$\mathrm{inv}\,\alpha_y = \mathrm{tg}\alpha_y - \alpha_y ; \tag{20}$$

где β – угол наклона зубьев;

В формуле (16) $S_{ty} = S_t$; $d_y = d_\partial$.

Формулы (6) и (7) с учетом формул (8) – (20) и введенных обозначений $C_1 = \frac{T_\partial}{2r_\partial}$; $C_2 = \left(\mathrm{tg}\left(\arccos\left(\frac{r_b}{r_\partial} \right) \right) - \arccos\left(\frac{r_b}{r_\partial} \right) \right)$ примут вид

$$X = r_x \cdot \sin\left(\left(C_1 - C_2 + \left(\mathrm{tg}\left(\arccos\left(\frac{r_b}{r_x} \right) \right) - \arccos\left(\frac{r_b}{r_x} \right) \right) \right) \right) \tag{21}$$

$$Y = r_x \cdot \cos\left(\left(C_1 - C_2 + \left(\mathrm{tg}\left(\arccos\left(\frac{r_b}{r_x} \right) \right) - \arccos\left(\frac{r_b}{r_x} \right) \right) \right) \right) \tag{22}$$

Уравнения (21) и (22) можно назвать каноническим уравнением эвольвентного профиля в параметрической форме. В этом уравнении координаты *X* и *Y* зависят только от одного параметра r_x.

Для определения активной ширины эквивалентного прямоугольного профиля (ЭПП) введем обозначения (рис.1). $W_{a\,(i+1)\,\min}$; $W_{a(i+1)\,\max}$; $W_{a\,(i+1)}$.

Площадь сечения среза (рис. 1)

$$S_{cc(i+1)} = 2S_{1-5-7-4} = 2S_{1-6-7-4} - 2S_{5-6-7} = 2S_{1-2-3-4} - 2S_{5-6-7}$$

Доказано, что $S_{1-2-3-4} = S_{1-6-7-4}$.

Так как $2S_{1-2-3-4} = 2 \cdot t_{i+1} \dfrac{W_{a(i+1)\max}}{2} = t_{i+1} \cdot W_{a(i+1)\max}$, то

$$S_{cc(i+1)} = 2 \cdot t_{i+1} \frac{W_{a(i+1)\max}}{2} - 2S_{5-6-7}. \qquad (23)$$

С другой стороны,

$$S_{cc(i+1)} = t_{i+1} \cdot W_{a(i+1)} \qquad (24)$$

Приравнивая уравнения (23) и (24), получим

$$t_{i+1} \cdot W_{a\max} - 2S_{5-6-7} = t_{i+1} \cdot W_{a(i+1)} \qquad (25)$$

Из уравнения (25)

$$W_{a(i+1)} = \frac{t_{i+1} \cdot W_{a(i+1)\max} - 2S_{5-6-7}}{t_{i+1}}. \qquad (26)$$

Задача состоит в определении $W_{a(i+1)\max}$, $W_{a(i+1)}$ и площади фигуры S_{5-6-7}.

Из рис. 1 видно, что $\dfrac{W_{a(i+1)\min}}{2}$ и $\dfrac{W_{a(i+1)\max}}{2}$ являются координатами X_1 и X_2 точек эвольвентного профиля впадины зуба. Соответственно, существуют и ординаты Y_1 и Y_2. Точки 5 и 6 идентифицируются радиус-векторами r_1 и r_2, соответственно. Методика дальнейшего расчёта такая.

1. Определяют координату Y_2.

$$Y_2 = \frac{d_f}{2} - \sum_{i+2}^{n} t_k + \sum_{i+2}^{n} t_k + t_{i+1} + \sum_{k=1}^{i} t_k, \qquad (27)$$

где $\sum_{k=1}^{i} t_k$ – сумма предыдущих глубин резания, мм; t_{i+1} – текущая глубина резания, мм; $\sum_{i+2}^{n} t_k$ – сумма последующих глубин резания, мм.

2. Из уравнения (22), зная координату Y_2, определяют радиус r_{x2}.
3. По уравнению (21) определяют координату $X_2 = f(r_{x2})$. Видно (рис.1), что

$$X_2 = \frac{W_{a\max}}{2}.$$ Следовательно, $W_{a\max} = 2X_2$.

4. Определяют координату $Y_1 = Y_2 - t_{i+1}$.
5. Из уравнения (22), зная координату Y_1, определяют радиус r_{x1}.
6. По уравнению (21) определяют координату $X_1 = f(r_{x1})$. $X_2 = f(r_{x2})$. Видно (рис. 1), что $X_1 = \frac{W_{a\min}}{2}$. Следовательно, $W_{a\min} = 2X_1$.
7. Определяют площадь фигуры $S_{5-6-7} = S_{9-5-6-10} - S_{5-7-10-9}$

$$S_{9-5-6-10} = \int_{r_{x1}}^{r_{x2}} Y(r_x) \cdot X'(r_x) dr_x; \quad (28)$$

$$S_{5-7-10-9} = (X_2 - X_1) Y_1. \quad (29)$$

8. Определяют активную ширину профиля $W_{a(i+1)}$

$$W_{a(i+1)} = \frac{t_{i+1} \cdot W_{a\max(i+1)} - 2\left(\int_{r_{x1}}^{r_{x2}} Y(r_x) \cdot X'(r_x) dr_x - (X_2 - X_1) Y_1 \right)}{t_{i+1}} \quad (30)$$

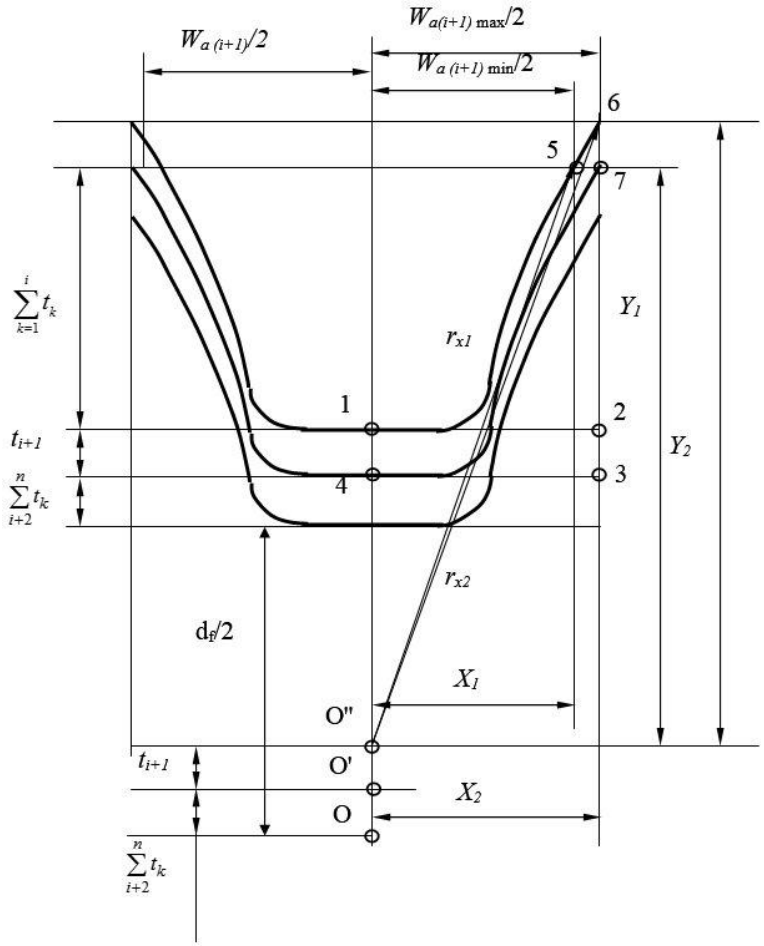


Рисунок 1 – Расчётная схема для определения активной ширины ЭПП

9. Определяют интенсивность шлифования по формуле Q_w, мм^3/с

$$Q_{w(i+1)} = S_{i+1} V_{\partial}, \text{ мм}^3/\text{с} \quad (31)$$

где S_{i+1} – площадь сечения среза на $(i+1)$-м ходе, мм^2; V_{∂} – скорость детали (скорость шлифовального круга вдоль зубчатого венца, мм/с).

Площадь сечения среза

$$S_{i+1} = W_{a(i+1)}\ t_{i+1}, \text{мм}^2 \tag{32}$$

Интенсивность шлифования на 1 мм ширины шлифовального круга $Q'_{w(i+1)}$, мм^3/(с мм)

$$Q'_{w(i+1)} = \frac{Q_{w(i+1)}}{W_{a(i+1)}}, \tag{33}$$

$$Q'_{w(i+1)} = \frac{W_{a(i+1)}\ t_{i+1}\ V_{\partial}}{W_{a(i+1)}} = t_{i+1}\ V_{\partial}.$$

Положение $W_{a(i+1)}$ в интервале $W_{a\min(i+1)} \cdots W_{a\max(i+1)}$ охарактеризуем параметром P

$$P = \frac{W_{a(i+1)} - W_{a\min(i+1)}}{W_{a\max(i+1)} - W_{a\min(i+1)}} \cdot 100\%. \tag{34}$$

Пример. Шлифовали заготовки зубчатых колес, изготовленных из стали 12Х2Н4А, прошедшие цементацию на глубину h = 0.7…1,2 мм и закалку до HRC 59. Метод шлифования – двупрофильное методом копирования. Параметры зубчатого колеса: Z = 40; m =3,75; d_{∂}=150 мм; d_a =153,75 мм; d_b =140,954мм; d_f =139 мм; коэффициент смещения исходного контура x = – 0,3 мм; α = 20 °; β = 0; коэффициент высоты головки h_a^*=0,8; коэффициент радиального зазора c^*= 0,25; коэффициент радиуса переходной прямой ρ_f^* =0,27 мм. Точность зубчатого колеса 7-Д. Шероховатость зубчатой поверхности Ra 3,2 мкм.

При удалении припуска на черновом, получистовом и чистовом этапе обработки высота впадины изменяется от 4,98 до 6,46 мм; от 6,46 до 7,2 мм; от 7,2 до 7,246+0,015=7,26 мм, соответственно (табл. 1). Для разных этапов обработки (чернового, получистового и чистового) изменяются активная ширина профиля $W_{a(i+1)}$, площадь сечения среза S_{i+1}, интенсивность

шлифования $Q_{w(i+1)}$. При этом интенсивность шлифования на 1 мм ширины шлифовального круга $Q'_{w(i+1)}$ уменьшается от этапа к этапу, а в пределах каждого этапа практически постоянна (табл. 1).

Результаты расчета предельных значений активной ширины ЭПП шлифовального круга и непосредственно активной ширины на каждом проходе сведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что параметр P, характеризующий положение интервала $W_{a(i+1)}$ составляет величину порядка 50 %. Это означает, что при расчете интенсивности шлифования по формулам (29) и (30) активную ширину ЭПП шлифовального круга $W_{a(i+1)}$ можно определить по формуле

$$W_{a(i+1)} = \frac{W_{a(i+1)\max} + W_{a(i+1)\min}}{2}. \qquad (35)$$

Таблица 1 – Расчётные параметры зубошлифования

Номер прохода	$\sum_{k=1}^{i} t_k$, мм	t_{i+1}, мм	$\sum_{i+2}^{n} t_k$, мм	$W_{a(i+1)}$, мм	S_{i+1}, мм^2	V_∂, мм/мин	$Q_{w(i+1)}$ мм^3/с	$Q'_{w(i+1)}$ мм^3/(с мм)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Черновой этап								
1	4,98	0,074	2,206	6,376	0,4718	1000	7,8637	1,233
2	5,054	0,074	2,132	6,435	0,47619	7000	55,555	8,6333
3	5,128	0,074	2,058	6,494	0,48056	7000	56,065	8,6333
4	5,202	0,074	1,984	6,554	0,48499	7000	56,582	8,6333
5	5,276	0,074	1,91	6,615	0,48951	7000	57,1095	8,6333
6	5,35	0,074	1,836	6,675	0,49395	7000	57,6275	8,6333
7	5,424	0,074	1,762	6,737	0,49854	7000	58,163	8,6333
8	5,498	0,074	1,688	6,799	0,5031	7000	58,698	8,6333
9	5,572	0,074	1,614	6,861	0,5077	7000	59,233	8,6333
10	5,646	0,074	1,54	6,925	0,51245	7000	59,786	8,6333
11	5,72	0,074	1,466	6,988	0,51711	7000	60,33	8,6333
12	5,794	0,074	1,392	7,052	0,5218	7000	60,88	8,6333
13	5,868	0,074	1,318	7,117	0,5266	7000	61,443	8,6333

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
14	5,942	0,074	1,244	7,182	0,5315	7000	62,005	8,6333
15	6,016	0,074	1,17	7,248	0,5363	7000	62,574	8,6333
16	6,09	0,074	1,096	7,314	0,5412	7000	63,144	8,6333
17	6,164	0,074	1,022	7,381	0,5462	7000	63,723	8,6333
18	6,238	0,074	0,948	7,448	0,5512	7000	64,301	8,6333
19	6,312	0,074	0,874	7,516	0,5562	7000	64,89	8,6333
20	6,386	0,074	0,8	7,584	0,5612	7000	65,475	8,6333
Припуск на сторону – 0,5 мм								
Получистовой этап								
1	6,46	0,074	0,726	7,653	0,56632	7000	66,071	8,6333
2	6,534	0,074	0,652	7,723	0,5715	7000	66,675	8,6333
3	6,608	0,074	0,578	7,792	0,57661	7000	67,271	8,6333
4	6,682	0,074	0,504	7,863	0,58186	7000	68,884	8,6333
5	6,756	0,074	0,43	7,934	0,5871	7000	68,497	8,6333
6	6,83	0,074	0,356	8,005	0,59237	7000	69,11	8,6333
7	6,904	0,074	0,282	8,077	0,5977	7000	69,731	8,6333
8	6,978	0,074	0,208	8,149	0,603	7000	70,353	8,6333
9	7,052	0,074	0,134	8,222	0,60843	7000	70,983	8,6333
10	7,126	0,074	0,06	8,296	0,6139	3000	30,695	3,7
Припуск на сторону – 0,25 мм								
Чистовой этап								
1	7,2	0,015	0,045	8,341	0,12511	2500	5,213	0,625
2	7,215	0,015	0,030	8,356	0,12534	2500	5,2225	0,625
3	7,23	0,015	0,015	8,371	0,12556	2000	4,1855	0,5
4	7,245	0,015	0	8,386	0,12579	1500	3,14475	0,375
Припуск на сторону – 0,02 мм								

Таблица 2 – Определение активной ширины ЭПП

Номер прохода	$W_{a(i+1)\min}$, мм	$W_{a(i+1)}$, мм	$W_{a(i+1)\max}$, мм	P, %
1	2	3	4	5
Черновой этап				
1	6,347	6,376	6,405	50
2	6,406	6,435	6,465	49,2
3	6,465	6,494	6,524	49,2
4	6,524	6,554	6,584	50
5	6,584	6,615	6,645	50,8
6	6,645	6,675	6,706	49,2
7	6,706	6,737	6,768	50
8	6,768	6,799	6,830	50

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5
9	6,830	6,861	6,893	49,2
10	6,893	6,925	6,956	49,2
11	6,956	6,988	7,020	50
12	7,020	7,052	7,085	49,2
13	7,085	7,117	7,149	49,2
14	7,149	7,182	7,215	50
15	7,215	7,248	7,281	50
16	7,281	7,314	7,347	50
17	7,347	7,381	7,414	50,7
18	7,414	7,448	7,482	50
19	7,482	7,516	7,550	50
20	7,550	7,584	7,619	49,3
Получистовой этап				
1	7,619	7,653	7,688	49,3
2	7,688	7,723	7,757	50,7
3	7,757	7,792	7,827	50
4	7,827	7,863	7,898	50,7
5	7,898	7,934	7,969	50,7
6	7,969	8,005	8,041	50
7	8,041	8,077	8,113	50
8	8,113	8,149	8,186	49,3
9	8,186	8,222	8,259	49,3
10	8,259	8,296	8,333	50
Чистовой этап				
1	8,333	8,341	8,348	53,3
2	8,348	8,356	8,363	53,3
3	8,363	8,371	8,378	53,3
4	8,378	8,386	8,393	53,3

Изменение параметров S_{i+1}, $Q_{w(i+1)}$ и $W_{a(i+1)}$ отражено на рис. 2 (сквозная нумерация проходов по оси абсцисс) и выводах.

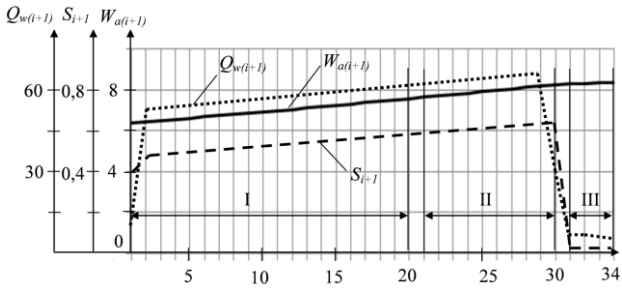


Рисунок 2 – Изменение параметров съема припуска: I, II, III – черновой; получистовой и чистовой этапы, соответственно

5. Выводы и перспективы развития

1. Получено каноническое уравнение эвольвенты в параметрическом виде, в соответствии с которым декартовы координаты эвольвенты X и Y являются функцией одного параметра – текущего радиус-вектора r_x.

2. Разработана методика определения активной ширины эквивалентного прямоугольного профиля $W_{a(i+1)}$ для любого (i+1)-ого рабочего хода, который производится от предыдущего положения эвольвентного профиля $\sum_{k=1}^{i} t_k$ к текущему положению $\sum_{k=1}^{i} t_k + t_{i+1}$, после которого остается припуск $\sum_{i+2}^{n} t_k$.

3. Установлено, что для обычных режимов многопроходного профильного зубошлифования указанная выше активная ширина профиля $W_{a(i+1)}$ определяется через свои предельные значения по выражению

$$W_{a(i+1)} = \frac{W_{a(i+1)\max} + W_{a(i+1)\min}}{2}.$$

4. Разработанная методика позволила определить интенсивность шлифования Q_w(мм^3/с) и удельную интенсивность шлифования на 1 мм ширины шлифовального круга $Q'_{w(i+1)}$, мм^3/(с мм). Установлено, что при постоянной скорости детали величина $Q_{w(i+1)}$ незначительно увеличивается с увеличением номера рабочего хода (от 55,555 мм^3/с до 70,983 мм^3/с). При этом величина $Q'_{w(i+1)}$ является постоянной 8,6333 мм^3/(с·мм).

5. Полученное уравнение эвольвенты позволяет применить известные положения аналитической геометрии для установления взаимосвязи между радиальным и нормальным исчислением припуска и глубины резания для определения температуры зубошлифования на различных участках эвольвентного профиля.

Список использованных источников: 1. *Калинин Е.П.* Теория и практика управления производительностью абразивной обработки с учетом затупления инструмента: Автореф. дисс… докт. техн. наук: 05.03.01. – Рыбинск, 2006. – 34 с. **2.** *Декаполитов М.И.* Повышение эффективности профильного зубошлифования цилиндрических колес путем расчета параметров статической наладки: Дисс.. канд. техн. наук: 05.02.07; 05.02.08. – Москва, 2013. – 212 с. **3.** *Родин П.Р.* Металлорежущие инструменты / *П.Р. Родин*. Учебник для вузов – 3-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища школа, 1986. – 455 с. **4.** *Анурьев В.И.* Справочник конструктора-машиностроителя / *В.И. Анурьев*. – в 3-х т., Т.2. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1978. – 559 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Kalinin E.P.* Teoriya i praktika upravleniya proizvoditel'nost'yu abrazivnoy obrabotki s uchetom zatupleniya instrumenta: Avtoref. diss… dokt. tekhn. nauk: 05.03.01. – Rybinsk, 2006. – 34 s. **2.** *Dekapolitov M.I.* Povyshenie effektivnosti profil'nogo zuboshlifovaniya tsilindricheskikh koles putem rascheta parametrov staticheskoy naladki: Diss.. kand.tekhn. nauk: 05.02.07; 05.02.08. – Moskva, 2013. – 212 s. **3.** *Rodin P.R.* Metallorezhushchie instrumenty / *P.R. Rodin*. Uchebnik dlya vuzov – 3-e izd., pererab. i dop. – K.: Vishcha shkola, 1986. – 455 s. **4.** *Anur'ev V.I.* Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya / *V.I. Anur'ev*. – v 3-kh t., T.2. – 5-e izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 559 s.

УДК 621.923.1

Н.В. ЛИЩЕНКО, канд. техн. наук,
В.П. ЛАРШИН, д-р техн. наук, Одесса,
А.Н. КОВАЛЬЧУК, канд. техн. наук, Харьков, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОФИЛЬНОГО ШЛИФОВАНИЯ НА СТАНКЕ С ЧПУ

Розглянуто параметри, що характеризують продуктивність профільного шліфування методом копіювання – об'ємний з'їм матеріалу в одиницю часу і загальний обсяг матеріалу, що видаляється. Виконано аналіз цих параметрів на основі порівняння методів їх визначення для профільного шліфування і для традиційних схем прямокутного шліфування – плоского і круглого. Сформульована концепція еквівалентного прямокутного профілю шліфувального круга, яким можна замінити будь-який довільний криволінійний профіль, наприклад трикутний або евольвентний, виходячи з рівності зазначених параметрів знімання припуску.
Ключові слова: продуктивність профільного шліфування, метод копіювання

Рассмотрены параметры, характеризующие производительность профильного шлифования методом копирования – объёмный съём материала в единицу времени и общий объём удаляемого материала. Выполнен анализ этих параметров на основе сравнения методов их определения для профильного шлифования и для традиционных схем прямоугольного шлифования – плоского и круглого. Сформулирована концепция эквивалентного прямоугольного профиля шлифовального круга, которым можно заменить любой произвольный криволинейный профиль, например треугольный или эвольвентный, исходя из равенства указанных параметров съёма припуска.
Ключевые слова: производительность профильного шлифования, метод копирования

The parameters that characterize the profile grinding method productivity – e.g., the specific material removal rate and the volume of cut material – are considered. An analysis of these parameters is made by comparison of methods of these parameters determining for the profile grinding and for rectangular grinding conventional operations – surface and cylindrical ones. A concept of an equivalent rectangular profile of the grinding wheel is advanced, which can replace any arbitrary curved profile, e.g., such as triangular or involute, based on the equality of mentioned material removal stock parameters.
Keywords: profile grinding, method productivity

1. Постановка проблемы. Чистовой финишный процесс по жесткой схеме (без упругих отжатий) является наиболее распространённым на заключительном этапе технологии изготовления зубчатых колёс. В качестве такого процесса используют шлифование, которое наиболее часто производят методом копирования профильным шлифовальным кругом (ШК), т.е. с периодическим прерыванием процесса резания, и методом обката червячным ШК с непрерывной генерацией обработанной зубчатой поверхности. В первом случае (discontinuous profile grinding) пятно контакта между ШК и изделием является постоянным при фиксированном

© Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, А.Н. Ковальчук, 2016

расположении профилей ШК и заготовки зубчатого колеса (ЗК), во втором (continuous generating gear grinding) – переменным.

Для оценки производительности и проектирования шлифовальной операции используется ряд характеристических величин, к числу которых относятся: количество удаляемого в единицу времени материала (material removal rate) Q_w (в мм^3/с), общий объём удаляемого материала V_w (в мм^3) и толщина среза (un-deformed chip thickness). В зарубежной литературе первые два показателя дополнительно приведены к единице эффективной (далее активной) ширины (width) ШК и обозначены соответственно: Q'_w в мм^3/(с·мм), и V'_w в мм^3/мм [1, 2]. В отечественной литературе показатель Q_w (в мм^3/с) называют расчётной интенсивностью съёма металла [3] (далее объёмный съём материала в единицу времени или интенсивность шлифования), однако для профильного (фасонного) шлифования отсутствуют методики его определения. Показатели V_w (в мм^3) и V'_w (в мм^3/мм) в отечественной литературе не получили должного распространения по той же причине. В этой связи разработка методики определения показателей Q'_w (specific material removal rate) в мм^3/(с·мм) и V'_w (volume of cut material) в мм^3/мм, для любой произвольной формы профиля ШК, например для треугольного или эвольвентного профиля, относится к числу актуальных задач технологии машиностроения.

2. Анализ последних исследований и публикаций. В работе [2] отмечается важность указанных выше показателей, названных «характеристическими величинами» (characteristic values), которые могут быть использованы для проектирования операции зубошлифования. Показана аналогия в оценке этих показателей для обычных операций плоского и наружного круглого шлифования с точки зрения постоянства контакта, которое имеет место в этих операциях и при зубошлифовании методом копирования. Эта аналогия заключается в использовании геометрических и кинематических условий для определения показателей Q'_w и V'_w. Например, применительно к схеме плоского шлифования

$$Q'_w = a_e \cdot V_f , \qquad (1)$$

где a_e и V_f – соответственно, глубина резания (мм) и скорость детали (мм/с) при плоском шлифовании. Аналогичные зависимости можно получить для традиционных схем круглого наружного и внутреннего шлифования, а также для врезного шлифования с поперечной подачей V_f (мм/с). Эти зависимости

для круглого наружного и внутреннего шлифования (рис. 1) имеют следующий вид [1].

Для продольного шлифования

$$Q'_w = (a_e \cdot n_w \cdot d_w \cdot \pi)/60, \quad (2)$$

где a_e – поперечная подача (глубина резания) на проход, мм; n_w – частота вращения заготовки, мин$^{-1}$; d_w – обрабатываемый диаметр (наружный или внутренний).

Для врезного шлифования

$$Q'_w = (V_{f'} \cdot d_w \cdot \pi)/60, \quad (3)$$

где $V_{f'}$ – поперечная подача на врезание, мм/с.

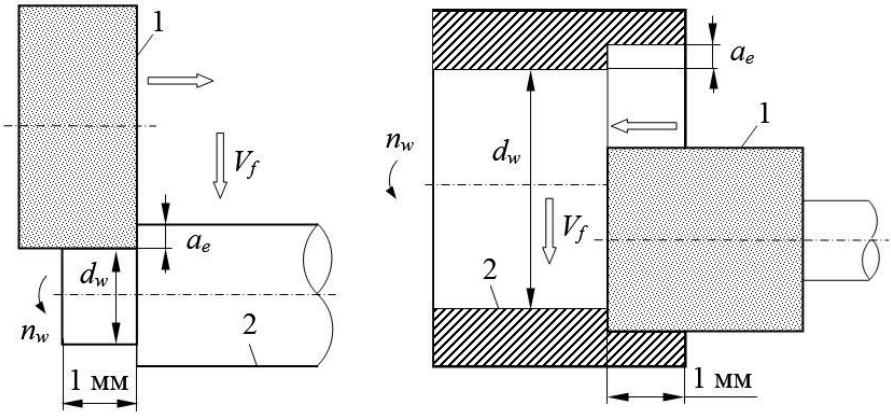


Рисунок 1 – Схемы круглого наружного (слева) и внутреннего (справа) шлифования с продольной подачей и врезного [1]

Однако, применительно к любому сложному профилю, например, эвольвентному, методика определения показателей Q'_w и V'_w в литературе отсутствует. Это сдерживает развитие эффективных САПР шлифовальных операций, а также встроенных в ЧПУ шлифовального станка компьютерных систем технологической диагностики.

При профильном шлифовании в отличие от прямоугольного шлифования (плоского шлифования, круглого шлифования с продольной подачей, врезного шлифования плоского и круглого) величину Q_w найти проблематично. Для этого необходимо выполнить интегрирование по

сечению сложного профиля [4], в том числе с учётом смещения осей профиля инструмента и шлифуемой впадины [5]. Подход с позиции единичного зерна [6] не получил дальнейшего развития в теории производительности шлифования. На основании проведённого теоретического анализа [7] возникла задача разработать инженерный метод, позволяющий упростить определение Q_w. и Q'_w для любой произвольной формы профиля, например, треугольной или эвольвентной формы.

3. Цель исследования заключается в разработке способа определения показателей Q'_w и V'_w для любой произвольной формы профиля при профильном шлифовании по жёсткой схеме, например, при зубошлифовании методом копирования. Для этого необходимо определить площади сечения среза, которые однозначно характеризуют эти показатели.

4. Материалы исследований. Для определения понятия «активная ширина профиля» ШК и «активная ширина эквивалентного прямоугольного профиля» (ЭПП) рассмотрим схему на рис. 2. На этой схеме треугольный профиль ШК (точки *IHE*) расположен симметрично по отношению к профилю предварительно сформированной канавки (точки *IOB*). Выполним геометрический анализ этой схемы.

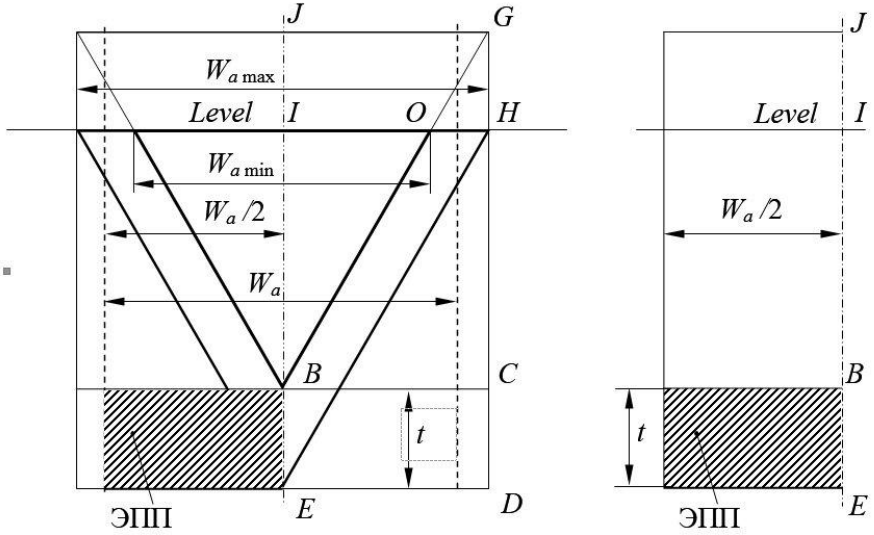


Рисунок 2 – Определение ЭПП (справа) для исходного треугольного профиля (слева) ШК: W_a – активная ширина ЭПП, $W_{a\,max}$ и $W_{a\,min}$ – активная ширина треугольного профиля на последующем (с глубиной резания t) и предыдущем рабочем ходе

Рассмотрим на рис. 2 площади фигур, расположенные справа от вертикальной оси симметрии и отмеченные буквами латинского алфавита (обозначения ниже – площади соответствующих фигур на рис. 2).

Видно, что

$$GHEB = JGHE - JGB \tag{4}$$

В свою очередь

$$JGHE = IHE + JGHI \tag{5}$$

Формула (4) с учетом формулы (5) имеет вид

$$GHEB = (IHE + JGHI) - JGB \tag{6}$$

Из рис.2 следует, что

$$IHE = JGB \tag{7}$$

Подставляем (7) в (6) и получаем

$$GHEB = (JGB + JGHI) - JGB = JGHI \tag{8}$$

Из (8) следует, что $GHEB = JGHI$. В свою очередь, из рис.2 видно $JGHI = BCDE$. Следовательно,

$$GHEB = BCDE \tag{9}$$

Далее видно, что

$$OHEB = GHEB - GHO \tag{10}$$

С учетом формулы (9) формула (10) принимает вид

$$OHEB = BCDE - GHO \tag{11}$$

Отсюда следует, что площадь сечения среза для ЭПП (заштрихованная площадь на рис. 2 – половина этой площади) меньше площади фигуры *BCDE*. Для нахождения площади ЭПП необходимо определить активную ширину ЭПП (W_a на рис. 2), причем $W_{a\min} < W_a < W_{a\max}$.

Для определения влияния бокового смещения предварительно обработанной впадины относительно профиля шлифовального круга рассмотрим рис. 3, где показано как изменяется форма сечения среза при появлении такого смещения Δh , причём $\Delta h_{cr} \geq \Delta h$.

Из рис. 3 видно, что

$$QHEM = OHEB + QOBEM \, . \tag{12}$$

В свою очередь

$$QOBEM = QOBM + MBE \, , \tag{13}$$

$$MBE = BPE \, , \tag{14}$$

$$OHPB = QOBM \, . \tag{15}$$

Кроме того

$$OHEB = OHPB + BPE\,. \tag{16}$$

С учетом уравнений (14) и (15)

$$QOBEM = OHEB \tag{17}$$

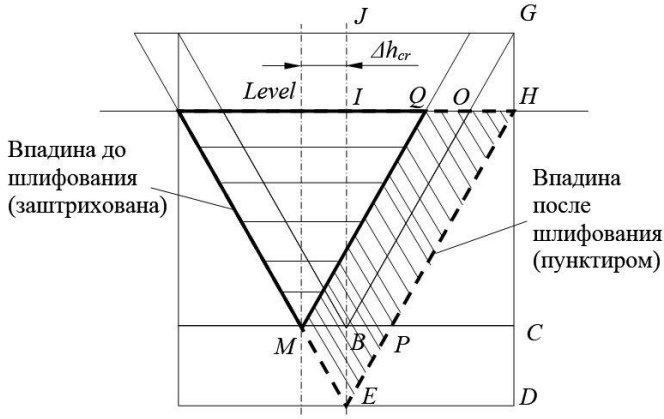


Рисунок 3 – Схема профильного шлифования
при несимметричном расположении
треугольного профиля ШК и шлифуемой впадины

Теперь с учетом (17), уравнение (12) принимает вид

$$QHEM = OHEB + OHEB = 2(OHEB)\,. \tag{18}$$

Ранее было установлено, что

$$OHEB = BCDE - GHO \text{ или } 2(OHEB) = 2(BCDE) - 2(GHO)\,.$$

С учетом уравнения (18)

$$QHEM = 2(BCDE) - 2(GHO)\,.$$

Следовательно, при смещении впадины из симметричного положения в положение заштрихованного профиля на рис.3 сечение среза становится не симметричным, но площадь этого сечения не изменяется. При этом должно быть выдержано очевидное условие $\Delta h_{cr} \geq \Delta h$, где Δh_{cr} и Δh – критическая и текущая величина смещения осей впадины и ШК. Далее рассмотрим более

общий случай удаления припуска за один рабочий ход профильного ШК. Для этого введём цифровые обозначения точек (рис. 4).

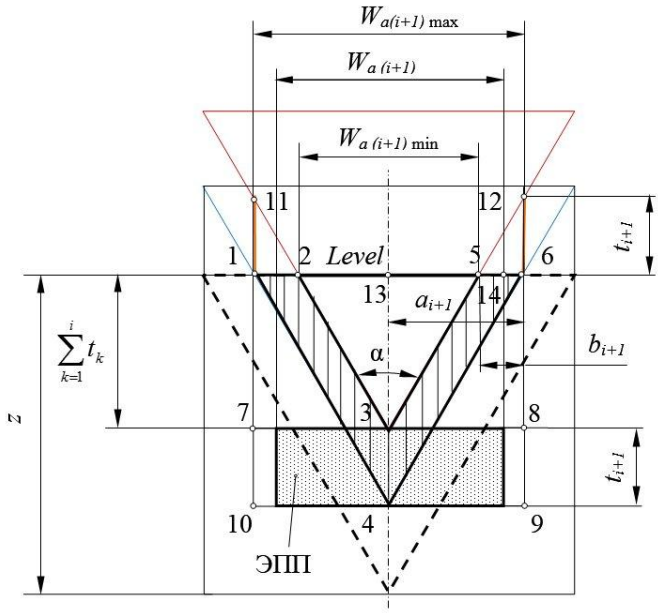


Рисунок 4 – Расчётная схема для определения активной ширины ЭПП

Зная глубину шлифования $t_{(i+1)}$ на очередной (i+1)-й ход определим объёмный съём материала в единицу времени в мм^3/с

$$Q_{w(i+1)} = S_{i+1} V_{\partial}\,, \tag{19}$$

где S_{i+1} – площадь сечения среза на (i+1)-м ходе, мм^2; V_{∂} – скорость детали (скорость шлифовального круга вдоль зубчатого венца, мм/с).

Из предыдущего анализа (рис. 1) установлено, что площадь фигуры 1–2–3–5–6–4 (вертикальная штриховка на рис. 4) равна разности площадей прямоугольника 7–8–9–10 и площадей двух одинаковых треугольников 1–11–2 и 5–12–6.

Запишем площадь сечения среза S_{i+1} в виде

$$S_{i+1}=S_{7\text{-}8\text{-}9\text{-}10}-2S_{1\text{-}11\text{-}2}\,, \tag{20}$$

где $S_{7-8-9-10} = 2t_{i+1}\,a_{i+1}$ – площадь прямоугольника 7–8–9–10; a_{i+1} – половина максимальной активной ширины профиля; $S_{1\text{-}11\text{-}2} = \frac{1}{2} t_{i+1}\,b_{i+1}$ – площади треугольников 1–11–2 и 5–12–6; b_{i+1} – приращение активной ширины профиля при установке глубины резания $t_{(i+1)}$.

Тогда интенсивность шлифования составляет

$$Q_{w(i+1)} = \left[2(t_{i+1} \cdot a_{i+1}) - 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot t_{i+1} \cdot b_{i+1} \right] \cdot V_{\partial}\,, \tag{21}$$

или

$$Q_{w(i+1)} = \left[2 \cdot t_{i+1} \cdot a_{i+1} - t_{i+1} \cdot b_{i+1} \right] \cdot V_{\partial} = V_{\partial} \cdot t_{i+1} \left(2a_{i+1} - b_{i+1} \right) \tag{22}$$

Найдем величины a_{i+1} и b_{i+1} из прямоугольных треугольников 4–6–9 и 5–12–6, соответственно. Получим

$$a_{i+1} = \mathrm{tg}\alpha \left(t_{i+1} + \sum_{k=1}^{i} t_k \right), \tag{23}$$

$$b_{i+1} = t_{i+1}\,\mathrm{tg}\alpha\,, \tag{24}$$

где α – половина угла профиля ШК; $\sum_{k=1}^{i} t_k$ – сумма глубин резания до установки глубины t_{i+1}.

Формула (22) с учетом зависимостей (23) и (24) принимает вид

$$Q_{w(i+1)} = V_{\partial} \cdot t_{i+1} \left(2\mathrm{tg}\alpha \left(t_{i+1} + \sum_{k=1}^{i} t_k \right) - t_{i+1}\,\mathrm{tg}\alpha \right) =$$

$$= V_{\partial} \cdot t_{i+1} \left(2\mathrm{tg}\alpha\, t_{i+1} + 2\mathrm{tg}\alpha \sum_{k=1}^{i} t_k - t_{i+1}\,\mathrm{tg}\alpha \right) =$$

$$= V_{\partial}\, t_{i+1}\,\mathrm{tg}\alpha \left(t_{i+1} + 2\sum_{k=1}^{i} t_k \right). \tag{25}$$

Таким образом, получили следующее выражение для интенсивности шлифования

$$Q_{w(i+1)} = V_\partial \, t_{i+1} \, \mathrm{tg}\alpha \left(t_{i+1} + 2\sum_{k=1}^{i} t_k \right).$$

Обозначим величину $\mathrm{tg}\alpha \left(t_{i+1} + 2\sum_{k=1}^{i} t_k \right)$ через $W_{a(i+1)}$. Назовем этот параметр активной шириной ЭПП.

Тогда

$$Q_{w(i+1)} = V_\partial \, t_{i+1} \, W_{a(i+1)}, \text{ мм}^3 / \text{с} \qquad (26)$$

Рассмотрим половину профиля и соответственно определим интервал, в котором находится значение $W_{a(i+1)}$ (рис.4) и W_a /2 (рис.3).

Длина отрезка 13–5 из прямоугольного треугольника 13–5–3 составляет $\mathrm{tg}\alpha \sum_{k=1}^{i} t_k$. Длина отрезка 13–6 из прямоугольного треугольника 13–6–4 составляет $\mathrm{tg}\alpha \left(t_{i+1} + \sum_{k=1}^{i} t_k \right)$. Длина отрезка 5–6 определяется как разность длин двух отрезков: (13–6) – (13–5).

Длина отрезка 5–6: $\mathrm{tg}\alpha \left(t_{i+1} + \sum_{k=1}^{i} t_k \right) - \mathrm{tg}\alpha \sum_{k=1}^{i} t_k = t_{i+1} \, \mathrm{tg}\alpha$

Длина отрезка 13–14 составляет

$$\mathrm{tg}\alpha \sum_{k=1}^{i} t_k + \frac{t_{i+1} \, \mathrm{tg}\alpha}{2} = \mathrm{tg}\alpha \left(\sum_{k=1}^{i} t_k + \frac{t_{i+1}}{2} \right).$$

Следовательно,

$$W_{a(i+1)} = 2\mathrm{tg}\alpha \left(\sum_{k=1}^{i} t_k + \frac{t_{i+1}}{2} \right) = 2\mathrm{tg}\alpha \sum_{k=1}^{i} t_k + 2\mathrm{tg}\alpha \frac{t_{i+1}}{2} = \mathrm{tg}\alpha \left(2\sum_{k=1}^{i} t_k + t_{i+1} \right).$$

Параметр $W_{a(i+1)}/2$ соответствует длине отрезка 13–14, который занимает среднее положение между отрезком 13–6 и отрезком 13–5. Эти отрезки, соответственно, равны $\frac{W_{a(i+1)\max}}{2}$ и $\frac{W_{a(i+1)\min}}{2}$.

Таким образом, величина $W_{a(i+1)}$ находится в интервале $W_{a(i+1)\min} < W_{a(i+1)} < W_{a(i+1)\max}$, которые в свою очередь представляют собой длины отрезков 2–5 и 1–6, соответственно (рис. 4).

Докажем, что $W_{a(i+1)}$ находится в вышеуказанном интервале. Для доказательства необходимо показать, что при условии $t_{i+1} \to 0$ имеет место $W_{a(i+1)} \to W_{a(i+1)\min}$, где $W_{a(i+1)\min}$ – предыдущая активная ширина контакта. При условии $t_{i+1} \to 0$, по мере стремления $\sum_{k=1}^{i} t_k$ к величине $\sum_{k=1}^{i} t_k + t_{i+1} = \text{const}$ имеет место переход $W_{a(i+1)} \to W_{a(i+1)\max}$,

где $W_{a(i+1)\max}$ – последующая активная ширина контакта.

Рассмотрим условие $W_{a(i+1)\min} = \lim_{t_{i+1}\to 0} W_{a(i+1)}$

$\lim_{t_{i+1}\to 0} W_{a(i+1)} = 2\text{tg}\alpha \sum_{k=1}^{i} t_k$. Из рис. 4 видно, что $W_{a(i+1)\min} = 2\text{tg}\alpha \sum_{k=1}^{i} t_k$.

Рассмотрим условие $W_{a(i+1)\max} = \lim_{t_{i+1}\to 0} W_{a(i+1)}$

Обозначим $\sum_{k=1}^{i} t_k + t_{i+1} = K = \text{const}$. Тогда $\sum_{k=1}^{i} t_k = K - t_{i+1}$. Выражение для определения $W_{a(i+1)}$ принимает вид

$$W_{a(i+1)} = \text{tg}\alpha \left(t_{i+1} + 2\left(K - t_{i+1}\right)\right).$$

$$\lim_{t_{i+1}\to K} W_{a(i+1)} = \lim_{t_{i+1}\to 0} W_{a(i+1)} = \lim_{t_{i+1}\to 0} \text{tg}\alpha \left(t_{i+1} + 2\left(K - t_{i+1}\right)\right) = 2K\,\text{tg}\alpha .$$

В момент достижения предела $\sum_{k=1}^{i} t_k = K$ (т.к. в этот момент $t_{i+1} = 0$).

Следовательно, $\lim_{t_{i+1}\to K} W_{a(i+1)} = 2\text{tg}\alpha \sum_{k=1}^{i} t_k$.

Найдем полный диапазон изменения $W_{a(i+1)}$ при условии, что $t_{i+1} \to 0$. Получим

$$\lim_{\sum_{k=1}^{n} t_k \to 0} W_{a(i+1)} = \lim_{\sum_{k=1}^{n} t_k \to 0} \operatorname{tg}\alpha \left(2\sum_{k=1}^{n} t_k + t_{i+1} \right) = 0$$

$$\lim_{\sum_{k=1}^{n} t_k \to z} W_{a(i+1)} = \lim_{\sum_{k=1}^{n} t_k \to z} \operatorname{tg}\alpha \left(2\sum_{k=1}^{n} t_k + t_{i+1} \right) = 2z \operatorname{tg}\alpha ,$$

где z – максимальная глубина впадины по чертежу (сумма напуска и припусков на лезвийную и абразивную обработку впадины).

Таким образом, активная ширина ЭПП на всём интервале $0 \ldots z$ изменяется от 0 до $2z \operatorname{tg}\alpha$ и для каждой текущей глубины резания изменяется в интервале $W_{a(i+1)\min} < W_{a(i+1)} < W_{a(i+1)\max}$ (рис. 4).

Зная текущий, т.е. на (i+1)-ом рабочем ходу, объёмный съём материала в единицу времени $Q_{w(i+1)}$ (в $\frac{\text{мм}^3}{\text{с}}$), можно найти соответствующие текущий показатель $Q'_{w(i+1)}$ на единицу активной ширины ШК (в $\frac{\text{мм}^3}{\text{с мм}}$) и текущий объём удаляемого материала $V'_{w(i+1)}$ (в $\frac{\text{мм}^3}{\text{мм}}$), причём независимо от формы профиля с учётом (19) получаем:

$$Q'_{w(i+1)} = \frac{Q_{w(i+1)}}{W_{a(i+1)}} = \frac{t_{i+1} W_{a(i+1)} V_f}{W_{a(i+1)}} = t_{i+1} V_f ;$$

$$V'_{w(i+1)} = \frac{Q_{w(i+1)}}{W_{a(i+1)}} \frac{B}{V_f} = B t_{i+1} .$$

где B – длина шлифуемого профиля (например, ширина зубчатого венца), мм; V_f – скорость, определяющая объёмный съём материала в единицу времени (например, скорость перемещения ШК по ширине зубчатого венца при профильном зубошлифовании).

Для системы технологической диагностики операции профильного шлифования можно организовать соответствующие счётчики накопленных показателей Q'_w и V'_w с предварительной установкой в системе ЧПУ станка соответствующих граничных значений, причём

$$Q'_w = \sum_{i=1}^{n} Q'_{wi} \; ; \quad V'_w = \sum_{i=1}^{n} V'_{wi} \; ,$$

где n – количество рабочих ходов ШК.

5. Выводы и перспективы развития

1. При несовпадении осей профиля шлифовального круга и шлифуемой впадины сечение среза становится несимметричным, но площадь этого сечения среза не изменяется по сравнению со случаем совпадения указанных осей. Следовательно, при прочих равных условиях смещение осей профиля шлифовального круга и профиля впадины шлифуемой заготовки не приводит к изменению объёмного съёма материала в единицу времени.

2. Активная ширина эквивалентного прямоугольного профиля $W_{a(i+1)}$ удовлетворяет условию $W_{a(i+1)\min} < W_{a(i+1)} < W_{a(i+1)\max}$, в котором параметры $W_{a(i+1)\min}$ и $W_{a(i+1)\max}$ представляют собой активную ширину фактического профиля шлифовального круга до и после установки глубины резания этим профилем на очередной (i+1)-й рабочий ход.

3. В общем случае формирования профиля впадины путём удаления слоя напуска и припусков на лезвийную и абразивную операции активная ширина эквивалентного прямоугольного профиля на всём интервале 0…z, изменяется от 0 до $2z\,\mathrm{tg}\alpha$, где z – размер впадины по чертежу; α – угол при вершине треугольного профиля.

4. Выполненные исследования являются необходимыми для формулирования и доказательства теоремы об эквивалентном прямоугольном профиле. В соответствии с этой теоремой параметры прямоугольного профиля находят исходя из эквивалента объёмного съёма материала в единицу времени для эквивалентного прямоугольного и реального профиля.

5. Указанный эквивалентный прямоугольный профиль с точки зрения объёмного съёма материала в единицу времени, характеризуется только двумя своими параметрами: глубиной резания (одинаковой для всех точек профиля) и активной шириной профиля, которая определена выше.

6. Разработаны рекомендации для технологической диагностики операции профильного шлифования на станке с ЧПУ, на основе активного контроля расчётных параметров, например, объёмного съёма материала в единицу времени и общего объёма срезаемого материала, в том числе в расчёте на единицу активной ширины профиля шлифовального круга.

Список использованных источников: 1. Руководство по зубошлифованию. Reishauer-Winterthur / [Electronic resource]. – Available on: http://www.winterthur technology.com Friday, 15 June 2016 12:09:07. **2.** *Brecher Christian*. Local Simulation of the Specific Material Removal Rate for Generating Gear Grinding / *Christian Brecher, Fritz Klocke, Markus Brumm, Florian Hübner* / GEARTECHNOLOGY. – September/October 2015. – P.86-90. **3.** *Попов С.А.* Алмазно-абразивная обработка металлов и твёрдых сплавов / *С.А. Попов, Н.П. Малевский, Л.М. Терещенко*. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с. **4.** Шлифование фасонных поверхностей / *А.И. Исаев, А.Н. Филин, М.С. Злотников, В.Ф. Совкин*. – М.: Машиностроение, 1980. – 152 с. **5.** *Якимов А.В.* Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей / *А.В. Якимов*. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с. **6.** *Корчак С.Н.* Производительность процесса шлифования стальных деталей / *С.Н. Корчак*. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.**7.** *Ларшин В.П.* Теоретический анализ методов наладки зубошлифовального станка с ЧПУ / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: материалы VI Всероссийской межвуз. научн.-техн. конф. – Уфа: УГАТУ, 2016. – С. 181-189.

Bibliography (transliterated): 1. Rukovodstvo po zuboshlifovaniyu. Reishauer-Winterthur / [Electronic resource]. – Available on: http://www.winterthur technology.com Friday, 15 June 2016 12:09:07. **2.** *Brecher Christian.* Local Simulation of the Specific Material Removal Rate for Generating Gear Grinding / *Christian Brecher, Fritz Klocke, Markus Brumm, Florian Hübner* / GEARTECHNOLOGY. – September/October 2015. – P.86-90. **3.** *Popov S.A.* Almazno-abrazivnaya obrabotka metallov i tverdykh splavov / S.A. *Popov, N.P. Malevskiy, L.M. Tereshchenko.* – M.: Mashinostroenie, 1977. – 263 s. **4.** Shlifovanie fasonnykh poverkhnostey / *A.I. Isaev, A.N. Filin, M.S. Zlotnikov, V.F. Sovkin.* – M.: Mashinostroenie, 1980. – 152 s. **5.** *Yakimov A.V.* Abrazivno-almaznaya obrabotka fasonnykh poverkhnostey / *A.V. Yakimov.* – M.: Mashinostroenie, 1984. – 312 s. **6.** *Korchak S.N.* Proizvoditel'nost' protsessa shlifovaniya stal'nykh detaley / *S.N. Korchak.* – M.: Mashinostroenie, 1974. – 280 s. **7.** *Larshin V.P.* Teoreticheskiy analiz metodov naladki zuboshlifoval'nogo stanka s ChPU / *V.P. Larshin, N.V. Lishchenko* // Sovremennye tendentsii v tekhnologiyakh metalloobrabotki i konstruktsiyakh metalloobrabatyvayushchikh mashin i komplektuyushchikh izdeliy: materialy VI Vserossiyskoy mezhvuz. nauchn.-tekhn. konf. – Ufa: UGATU, 2016. – S. 181-189.

УДК 621.923.12

Н.О. МЕЛЬНИК-КАГЛЯК,
С.В. СОХАНЬ, д-р техн. наук, Київ, Україна

НАУКОВІ ПЕРЕДУМОВИ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ ТОНКОСТІННОЇ ОБОЛОНКИ З КЕРАМІКИ АБО САПФІРУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ БАГАТОШАРОВОЇ ГОЛОВКИ ПРОТЕЗУ КУЛЬШОВОГО СУГЛОБУ ЛЮДИНИ

Виготовлення протезів головок кульшових суглобів з підвищеними експлуатаційними характеристиками, є актуальною задачею. Підвищення цих характеристик можна досягти за рахунок виготовлення головок багатошарової конструкції. Для виготовлення даної конструкції, розроблено кінематичну схему алмазного шліфування, згідно з якою було виконано моделювання схеми контакту «інструмент-заготовка». Проведено моделювання напружено-деформованого стану головки багатошарової конструкції, визначено мінімальну товщину керамічної (сапфірової) оболонки. Визначено номенклатуру шліфувального інструменту, придатного для виготовлення оболонок стандартного розмірного ряду. Досліджено область варіації взаємного розміщення інструмента та заготовки під час обробки. Експериментально встановлені силові параметри процесу обробки за умови сталості величини зрізуваного об'єму.
Ключові слова: протези головок кульшових суглобів, алмазне шліфування

Повышение эксплуатационных характеристик и срока службы протезов головок тазобедренных суставов, безусловно, является актуальной задачей. Достичь улучшения упомянутых характеристик возможно за счет изготовления головок многослойной конструкции. Для изготовления данной конструкции была разработана кинематическая схема алмазного шлифования, согласно которой было выполнено моделирование схемы контакта «инструмент-заготовка». Проведено моделирование напряженно-деформированного состояния головки многослойной конструкции, определена минимальная толщина керамической (сапфировой) оболочки. Определена номенклатура шлифовального инструмента, пригодного для изготовления оболочек стандартного размерного ряда. Исследована область вариации взаимного размещения инструмента и заготовки при обработке. Экспериментально определены силовые параметры процесса обработки при условии стабильности величины срезаемого объёма.
Ключевые слова: протезы головок тазобедренных суставов, алмазное шлифование

Production head of hip joints prosthesis with high performance, is an urgent task. Improving these characteristics can be achieved by making heads multilayer construction. To produce this design, kinematic scheme of diamond grinding was developed, under this scheme was carried out modeling of contact "tool-workpiece". The modeling of stress-strain state heads multilayer structures was developed, minimum thickness of ceramic (sapphire) shell was defined. Range of tools suitable are defined for making shells standard size range. Fields of mutual accommodation tool and workpiece variations during machining were investigated. The power machining parameters were experimentally investigated in subject to stability values of treated volume.
Keywords: head of hip joints prosthesis, diamond grinding

Актуальність

Виготовлення тонкостінних сферичних оболонок з важкооброблюваних матеріалів (сапфір, цирконієва кераміка, композити на їх основі) є

© Н.О. Мельник-Кагляк, С.В. Сохань, 2016

актуальною задачею. Першочергово, потреба у виготовленні таких оболонок з'являється під час реалізації нової багатошарової конструкції протезу головки кульшового суглобу, представленої в наших попередніх роботах [1].

На сьогоднішній день, кількість випадків захворюваності суглобів, що вимагають подальшого оперативного втручання стало збільшується. Разом з тим фіксується зменшення середнього віку людей, що страждають на згадані проблеми. Дана тенденція змушує медиків закликати населення вести здоровий та більш рухомий спосіб життя, що має пригальмувати цю тенденцію, але має довгострокову перспективу, що не усуває нагальної потреби в довговічній парі тертя, для використання її в конструкціях ендопротезів суглобів. Більше того, є необхідність у розробці компонентів пар тертя для застосування в ендопротезуванні, які могли б витримати більш високі навантаження [2], для молодих та рухливих пацієнтів. В умовах нестабільності та бойових дій, дане питання гостро постало і для України. Тому, питання виготовлення ендопротезів з підвищеними експлуатаційними властивостями загалом, та виготовлення тонкостінних сферичних оболонок з важкооброблюваних матеріалів для багатошарової головки протезу кульшового суглобу зокрема, є актуальними задачами, яким слід приділити особливу увагу.

Вступ

Підвищеним вимогам до функціональних властивостей та навантажень на головку протезу кульшового суглобу може задовольнити головка багатошарової конструкції [1]. Дана головка складається зі зносостійкої тонкостінної ($\delta \geq 3$ мм) оболонки з сапфіру або кераміки ззовні й серцевини з металу (рис. 1). Така конструкція дозволяє реалізувати модульний принцип приєднання головки до ендопротезу на базі конусного посадкового з'єднання метал-метал [3], усунувши негативний вплив на зносостійку оболонку розтягувальних напружень від посадки ніжки в головку ендопротезу.

Однак, реалізація багатошарової конструкції потребує вирішення ряду наукоємних завдань, зокрема пов'язаних з виготовленням тонкостінної сферичної оболонки з сапфіру чи кераміки. Спосіб [4] виготовлення такої оболонки передбачає використання процесу шліфування кінцевим алмазним інструментом для формоутворення внутрішньої сферичної поверхні. Оскільки і оксидна кераміка, і сапфір відносяться до важкооброблюваних матеріалів, процес виготовлення з них тонкостінної оболонки шліфуванням, вимагає застосування інструменту з надтвердих матеріалів. Виходячи з фізико-механічних властивостей оброблюваних матеріалів, доцільно використовувати алмазний інструмент. При чому, слід пам'ятати, що зношування інструменту буде позначатися на точності оброблення.

Окрім того, необхідно встановити товщину оболонки, достатню для надійної роботи в умовах експлуатаційних навантажень; визначити діапазон

розмірів інструментів та їх робочих рухів для гарантованого формування заданої поверхні; напрацювати підходи для реалізації обробки з контрольованими параметрами якості (товщина тріщинуватого шару).

Виходячи з вищенаведеного, мету даної роботи можна сформулювати наступним чином: розробити наукове обґрунтування процесу алмазного шліфування тонкостінної сферичної оболонки з кераміки та сапфіру, зокрема її внутрішньої сферичної поверхні для виготовлення багатошарової головки протезу кульшового суглобу.

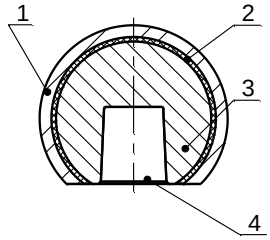


Рисунок 1 – Головка протезу кульшового суглобу багатошарової конструкції: 1 – зовнішня оболонка з кераміки, або сапфіру, 2 – технологічний прошарок, 3 – металева серцевина, 4 – конічний отвір

Постановка задачі для моделювання процесу оброблення

Загалом у протезуванні кульшових суглобів, використовують типовий ряд найуживаніших розмірів головок протезів (рис. 2), а саме: Ø28 мм (з висотою сфери 24,5 мм), Ø32 мм (28 мм), Ø36 мм (30 мм), Ø36 мм (32 мм), Ø40 мм (32 мм), Ø40 мм (34 мм).

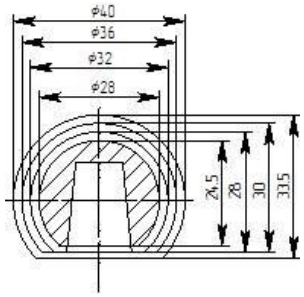


Рисунок 2 – Типорозміри головок кульшових ендопротезів

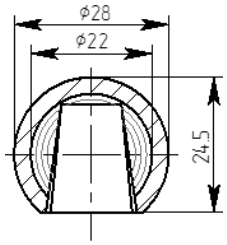


Рисунок 3 – Геометрична форма припуску

Враховуючи особливість геометричної форми оброблюваної поверхні (рис. 4), процес оброблення потребує складних формотворних рухів, і за

рахунок складної досяжності окремих оброблюваних ділянок потребує накладання додаткових обмежень у виборі інструменту.

Раціональний підхід до процесу формотворення внутрішньої сферичної поверхні у сапфіровій або керамічній заготовці алмазним шліфуванням полягає, на наш погляд, у стабілізації об'єму зрізуваного припуску за одиницю часу, за рахунок керування подачею.

В даний час, існує два метода для планування керування подачею: один базується на MRR (Material Removal Rate), інший базований на силі різання.

Lan [5] запропонував математичну модель і критерії прийняття рішень з метою досягнення оптимального управління MRR. Yazar [6] виконує оптимізацію подачі, базуючись на обрахунку сили різання в 3-осьовому фрезеруванні штампів та прес-форм. Baek та інші [7] сфокусувалися на пошуку оптимальної подачі для торцевого фрезерування з метою максимізації MRR з обмеженням поверхневої шорсткості. Liu [8] запропонував теоретичну динамічну модель сили різання для фрезерування кінцевими фрезами. Taunsi [9] інтегрував динаміку приводу подачі з плануванням траєкторії (за мінімальний час) для того, щоб досягти бажаної подачі у відповідному положенні. Li [10] вивчав питання оптимізації швидкості подачі для варіанту процесу фрезерування, спираючись на розрахунки сили різання.

Вищезгадані наукові праці, а також [11] розроблені для швидкісного оброблення металів фрезеруванням, описують ідею, яка являється основоположною для розробки підходу керування подачею під час процесу шліфування абразивним інструментом надтвердого матеріалу Цей процес має свої особливості та свою систему обмежень, пов'язану із обробленням крихкого матеріалу і зношуванням інструменту.

Огляд літературних джерел показав, що існують численні спроби задіяти методи моделювання і симулювання процесів шліфування для отримання вичерпного уявлення про можливі шляхи керування процесом оброблення. За допомогою методів кінцевих елементів, молекулярно-динамічних моделей одиничного зерна, моделі процесу проектування на основі штучних нейронних мереж, моделей на основі законів та знань, аналітичних моделей, а також моделей регресії можна описати ефекти теплового, хімічного, динамічного і механічного процесів. Особливо великий потенціал для покращення розуміння процесу шліфування мають кінематично-геометричні моделі, через їх спрощений розгляд основних закономірностей процесу.

Для процесу шліфування алмазним інструментом внутрішньої сферичної поверхні накладемо наведені нижче обмеження. У крихких неметалевих матеріалів, таких як технічна кераміка, навіть м'які режими оброблення при шліфуванні призводять до утворення мікротріщин на поверхні, що оброблюється, що знижує міцність даних матеріалів. Після механічного оброблення матеріал деталі послаблений дефектами двох видів: структурними, що обумовлені технологією виготовлення заготовки (не враховуються у нашій системі), і оброблюваними, викликані дією (силовою та тепловою) ріжучого інструмента при механічному обробленні. Тому,

одним з основних критеріїв контролю якості отриманої поверхні буде величина тріщинуватого шару.

Одна з цільових функцій – це забезпечення постійного об'єму зрізуваного шару на кожному кроці. Для цього приймаємо за константу величину MRR. Забезпечення постійного об'єму зрізуваного матеріалу відбувається за рахунок керування подачею, яка в свою чергу корелює величину сили різання.

Отже, постановка задачі виглядає наступним чином. Отримати діапазон значень величини подачі для забезпечення максимально допустимого об'єму зрізуваного матеріалу за одиницю часу, задовольняючи умови точності. Система обмежень складається з обмеження допуском на виконуваний розмір Td (відхилення має бути меншим або рівним допуску, даний показник залежатиме від величини зношування інструмента), обмеження сили різання (обмеження обумовлене величиною тріщинуватого шару), а також умовою не від'ємності відповідних складових.

Разом з тим в наведеній моделі не враховуються наступні фактори: коливання системи, термічна складова процесу різання, можливі термохімічні удари, дія залишкових напружень в оброблюваному матеріалі та їх розміщення.

Під час оброблення внутрішньої сферичної поверхні у різального інструменту на окремих ділянках траєкторії задіяна лише торцева частина, тоді як на інших в інструменті працює як торцева так і периферійна частини. Дані складні взаємодії (рис. 4) враховуватимуться за результатами експериментального дослідження. Кінематична схема оброблення представлена на рис. 5.

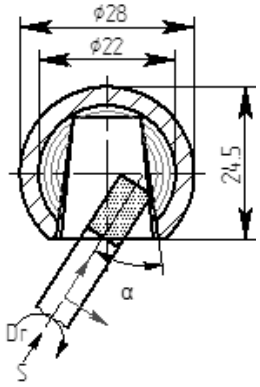


Рисунок 4 – Врахування кута нахилу інструмента протягом процесу оброблення

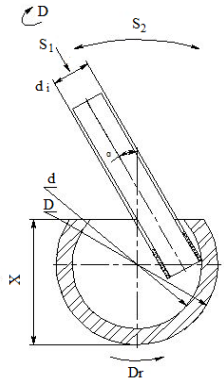


Рисунок 5 – Кінематична схема оброблення

Реалізація розробленої моделі дозволить за рахунок керування подачею забезпечити стабільність величини зрізуваного шару, і, як наслідок, не перевищити допустиму товщину тріщинуватого шару внутрішньої сферичної поверхні цирконієвої кераміки та сапфіру алмазним шліфуванням.

Моделювання

М 1.1 моделювання напружено-деформованого стану

Дослідження напружено-деформованого стану двошарової головки ендопротезу кульшового суглобу, яке проводилося методом скінчених елементів у програмі ANSYS 14.5.7, показало, що найбільші напруження виникають у сапфіровому шарі головки у її верхній частині та на контактній поверхні титанового шару головки.

Основними найбільш впливовими конструктивними факторами на навантажувальну здатність ендопротезу є товщина головки, зазор між вкладишем та головкою, довжина конусу посадкового отвору, кут конусу посадкового отвору. Товщина сапфірової оболонки головки є найбільш впливовим фактором з усіх названих. Дослідження показало, що товщина оболонки в межах 2-3 мм забезпечує міцність головки з коефіцієнтом запасу більше 2.

М1.2 Моделювання оброблюваності внутрішньої сферичної поверхні інструментами різного діаметру.

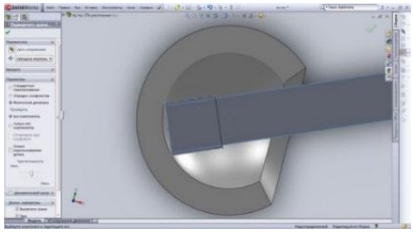
Проведене, за прийнятою кінематичною схемою оброблення (рис. 5), моделювання процесу дозволило встановити номенклатуру діаметрів кінцевого інструменту, які дозволяють обробити внутрішню сферичну поверхню. Головку Ø36 мм (**X=30 мм)** з товщиною стінки 3 мм, 4 мм і 5 мм ми можемо обробити алмазним інструментом Ø9 мм, а головку Ø40 мм **(X=32 мм та X=34 мм)** з товщиною стінки від 3мм до 6мм – інструментом діаметрами Ø10 мм, Ø12 мм, Ø14 мм відповідно. Однак, при моделюванні обробки головки Ø28 мм (**X=24,5 мм)**, яка вважається найуживанішою, спостерігалося утворення сірої зони, обробити яку без заміни інструменту, чи взаємного положення інструменту та деталі, виявилося не можливо. При моделювання проходжуваності інструментами Ø5 мм і Ø6 мм, також присутня сіра зона (рис. 6), розміри якої: при товщині стінки 3мм – від 1,45 до 1,7 мм, а при товщині стінки 4мм – від 1,667 до 1,98 мм відповідно.

Моделювання показало присутність зони (рис. 6, в – сіра зона), яка за рахунок своєї кривизни не дозволяє повністю себе обробити. Дана зона знаходиться на початку схеми оброблення і не перевищую 3мм. По результатам напружено-деформованого стану конструкції буде прийняте рішення, щодо подальших дій пов'язаних з сірою зоною.

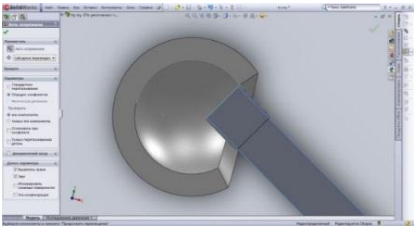
М1.3 Моделювання діапазону оброблення для визначення можливих кутів нахилу інструменту відносно заготовки.

Для проведення попереднього експерименту, що враховував би залежність сили різання від подачі та величини площі контакту інструменту з

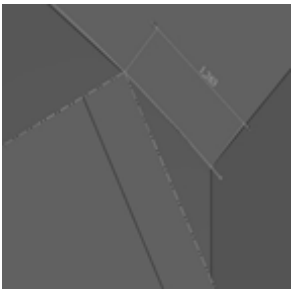
оброблюваним матеріалом, було виконано моделювання кутів нахилу інструменту відносно заготовки в різних точках траєкторії. Моделювання полягало в наступному: для головки Ø28мм було визначено допустиму товщину стінки оболонки, яка склала 3мм. Виходячи з величини стінки оболонки та майбутнього конусного посадкового отвору було визначено об'єм матеріалу, який потребує видалення, для подальшого заповнення порожнини металом. На даний припуск було накладено траєкторію оброблення з кроком (величиною припуску) 0,5 мм (рис. 7).



а)



б)



в)

Рисунок 6 – Моделювання оброблення:
а) початок оброблення,
б) завершення оброблення (варіант з позитивним результатом),
в) ділянка, яка не підпадає під оброблення на початку траєкторії руху
в разі неправильного вибору інструмента

Згідно з накладеної траєкторії оброблення проведено моделювання процесу шліфування інструментом Ø6мм і виміряно величини кутів нахилу осі інструменту до нормалі сфери в точках контакту. Для проведення вимірювань було виділено 6 характерних точок (рис. 7). Характерні точки обиралися в залежності від їхнього розташування на сфері, в місцях, в яких очікуються різкозмінні результати, а саме точка 1 та 6 в кінці та на початку

руху інструмента відповідно, точки 2-5 було обрано рівновіддалено по траєкторії. Результати вимірювань наведені в табл. 1.

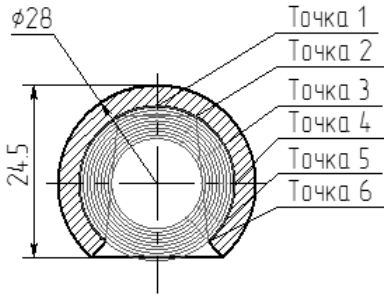


Рисунок 7 – Врахування кута нахилу інструмента протягом процесу оброблення.

Таблиця 1 – Моделювання кута нахилу інструмента до нормалі поверхні сфери

Сфера:Ø28мм, X=24,5мм, t=3мм, Інструмент:Ø6мм	**Кут α**					
	Точка 1	**Точка 2**	**Точка 3**	**Точка 4**	**Точка 5**	**Точка 6**
Траєкторія 1	15.58-22.03	17.01-37.34	24.06 - 52.78	41.64-65.63	61.28-80.68	75.52-90.00
Траєкторія 2	16.75-22.05	16.69-37.38	24.89-52.49	42.36-65.74	62.91-80.83	77.98-90.00
Траєкторія 3	17.55-22.13	18.03-37.55	25.54-52.72	42.90-65.59	64.15-80.65	79.48-90.00
Траєкторія 4	18.57-22.65	18.44-37.62	26.83-53.84	44.44-65.71	65.66-80.34	81.60-90.00
Траєкторія 5	19.21-22.50	19.69-37.44	27.67-53.25	44.93-65.74	67.31-80.85	83.40-90.00
Траєкторія 6	20.87-22.85	21.75-37.87	28.80-53.57	46.03-65.61	69.05-80.99	85.38-90.00
Траєкторія 7	22.26-22.75	22.17-37.90	29.78-50.85	47.40-65.59	70.62-80.71	87.44-90.00
Траєкторія 8	f	23.73-38.07	31.43-50.84	48.40-65.76	72.55-81.08	89.48-90.00
Траєкторія 9	f	26.39-38.15	32.95-50.72	50.16-65.49	73.92-80.65	f
Траєкторія 10	f	28.02-38.45	34.95-50.39	53.60-65.85	76.84-80.66	f

Дані виміри наглядно демонструють очевидну поліваріантність процесу без обмежень в русі, окрім заданої траєкторії. Тому, для отримання

оптимальних (за продуктивністю) режимів різання, що дозволять отримати прийнятної точності деталь, потрібна система обмежень руху, яка забезпечує однозначний варіант руху по заданій траєкторії. Згідно якої для кожної точки зони контакту інструменту з оброблюваним матеріалом, виконується розрахунок площі контакту. Перш за все це будуть обмеження викликані сталою величиною державки інструмента, математичним рівнянням руху точки на інструменті, що рухається вздовж траєкторії. Дані розрахунки слугуватимуть вхідною інформацією для встановлення залежностей сил різання та швидкості знімання припуску, тобто розрахунку матиматичної моделі процесу.

Експериментальні дослідження

Для врахування залежностей сили різання від площі контакту (що регулюється за рахунок зміни кута нахилу різального інструменту α) та сила різання від подачі (при визначених кутах нахилу інструмента α та величині припуску t), в розрахунку наведеної моделі було проведено першу серію експериментальних вимірів сили різання при шліфуванні плоского зразка кераміки (ZrO2 (+ HfO2) алмазним інструментом за схемою обробки зображеною на рис. 8

Експерименти були проведені на шліфувальному верстаті з ЧПК моделі OMM64SCE02 (рис. 9).

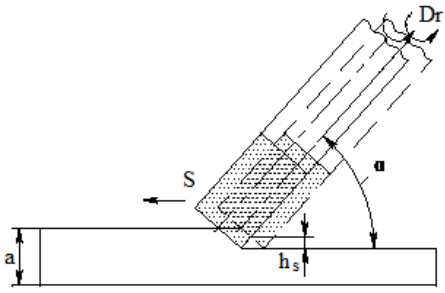


Рисунок 8 – Схема обробки для встановлення залежностей сили різання від кута нахилу інструмента та подачі

Рисунок 9 – Експериментальний багатофункціональний 4-координатний стенд на базі горизонтально-фрезерного верстата моделі OMM64SCE02

В якості інструменту був використаний кільцевий алмазний інструмент для шліфування сферичної поверхні: зернистістю 125/100 (рис. 10).

Результати вимірювань наведені в табл. 2.

Рисунок 10 – Алмазний інструмент для шліфування сферичної поверхні: кільцевий (зліва), типу АГЦ (в центрі і справа)

Таблиця 2– Експериментальні дані

Номер експерименту	Кут	Глибина H, мм	Подача S, мм/хв	Сила Px, H	Сила Py, H	Ra, мкм
1	15	0.05	10	6.4	3.25	0.52
2	15	0.1	10	6.8	3.9	0.61
3	15	0.05	20	8	4.2	0.65
4	15	0.1	20	8.8	5.2	0.7
5	15	0.05	40	9.6	6.5	0.75
6	15	0.1	40	10.4	6.8	0.79
7	75	0.05	10	4	2.3	0.3
8	75	0.1	10	4.4	2.47	0.35
9	75	0.05	20	4.64	2.6	0,398
10	75	0.1	20	4.8	3.25	0.45
11	75	0.05	40	5.2	3.9	0.499
12	75	0.1	40	5.6	4.42	0.55
13	15	0.05	60	10.4	6.95	0.84
14	15	0.1	60	12	7.15	0.88

Висновки

В ході роботи над темою було отримані перші результати, а саме було визначено мінімальну величину стінки тонкостінної сферичної оболонки, яка задовольняє вимоги (тонкостінна сапфірова або керамічна оболонка повинна, в поєднанні з металевою серцевиною, витримувати експлуатаційні навантаження). Для описання процесу оброблення згаданої деталі було проведене моделювання, яке дозволило визначити ряд допустимих розмірів інструменту, що може виконати дане оброблення. Перша серія експериментів була успішно завершена і дала фактичні значення складових сил різання при обробці плоских заготовок алмазним інструментом під кутом до оброблюваної поверхні.

Подальша робота

В подальшій роботі планується наступна серія експериментальних досліджень впливу кута нахилу інструмента на силу різання та якість поверхні деталі. Після дослідження величини тріщинуватого шару в отриманих зразках, буде зроблено висновок про пригодність обраних режимів та можливість покладання результатів дослідження в основу математичної моделі процесу оптимізації режимів різання сапфіру та кераміки при внутрішній обробці сферичної поверхні при стабілізації силових параметрів процесу.

Список використаних джерел: **1.** Пат. 105063 Україна, МПК A61F2/32(2006.1) Головка ендопротеза кульшового суглоба / *С. В. Сохань, Н. О. Мельник-Кагляк, Л. Ф. Головко*. – № u201503078 ; заявл. 03.04.2015; опубл. 10.03.2016, Бюл. № 5. **2.** *Affatato S., Goldoni M. at al.* Mixed oxides prosthetic ceramic ball heads. Part 3: effect of the ZrO_2 fraction on the wear of ceramic on ceramic hip joint prostheses. A long-term in vitro wearstudy / Biomaterials 22 (2001) 717-723. **3.** *Affatato S., Testoni M. at al.* Mixed oxides prosthetic ceramic ball heads. Part 1: effect of the ZrO_2 fraction on the wear of ceramic on polyethylene joints / Biomaterials 20 (1999) 970-975. **4.** Пат. 105064 Україна, МПК A61F2/32(2006.1) Спосіб виготовлення головки ендопротеза кульшового суглобу./ *С. В. Сохань, Н. О. Мельник-Кагляк, Л. Ф. Головко*. – № u201503078 ; заявл. 03.04.2015; опубл. 10.03.2016, Бюл. № 5. **5.** *Lan T. S., Hsu K. S.* The implementation of optimum MRR on digital PC-based lathe system / Int J Adv Manufact Technol, 35(3-4) (2007) 248-254. **6.** *Yazar Z., Koch K. F.* Feedrate optimization based on cutting force calculations in 3-axis milling of dies and molds with sculptured surfaces / Int J Mach Tool Manufact, 34(3) (1994) 365-377. **7.** *Baek D. K., Ko T. J. at al.* Chip volume prediction using a numerical control verification model / Int J Mach Tool Manufact. 46(12-13) 1326-1335. **8.** *Liu X. W., Cheng K.* Improved dynamic cutting force model in ball-end milling. Part I: theoretical modeling and experimental calibration / Int J Adv Manufact Technol, 26(5) (2005) 457-465. **9.** *Taunsi N., Elbestawi M. A.* Optimized feed scheduling in three axes machining. Part I: fundamentals of the optimized feed scheduling strategy / Int J Mach Tool Manufact. 43 (2003) 253-267. **10.** *Li Z. Z., Zhang Z. H.* Feedrate optimization for variant milling process based on cutting force prediction / Int J Adv Manufact Technol. 24(7-8) 541-552. **11.** *Affatato S., Goldoni M. at al.* Mixed oxides prosthetic ceramic ball heads. Part 2: effect of the ZrO_2 fraction on the wear of ceramic on ceramic joints / Biomaterials 20 (1999) 1925-1930. **12.** *Della Valle A. G.* Wear of a highly cross-linked polyethylene liner associated with metallic deposition on a ceramic femoral head / J. Arthroplasty 4 19 (2004) 532-536. **13.** *Hernigou P., Zilber S. at al.* Ceramic-ceramic bearing decreases osteolysis: A 20-year study versus ceramic-polyethylene on the contralateral hip / Clin. Orthop. 9 467 (2009) 2274-2280. **14.** *Capello W. N. et al* Ceramiic-on-ceramic total hip arthroplasty: update / J. Arthroplasty. 7 23

(2008) 39-43. **15.** *Clarke I. C., Gustafson A.* Clinical and hip simulator comparisons of ceramic-on-polyethylene and metal-on-polyethylene wear / Clin. Orthop. Relat Res. 379 (2000) 34-40. **16.** *McKellop H.* Bearing surfaces in total hip replacements: State of the art and future developments / Instr. Course Lect. (2007) 83-97. **17.** *Heisel C., Silva M. at al.* Short-term in vivo wear of cross-linked polyethylene / J. Bone Joint. Surg. 4 86-A (2004) 748-751. **18.** *Heisel C., Silva M. at al.* Bearing surface options for total hip replacement / Instr. Course Lect. Hip. (2007) 103-119. **19.** *Dowson D,* New joints for the Millennium: Wear control in total replacement hip joints / Proc. Inst. Mech. Eng. H. 215 (2001) 335-358.

Bibliography (transliteratrated): 1. Pat. 105063 Ukraïna, MPK A61F2/32(2006.1) Golovka endoproteza kul'shovogo sugloba / *S. V. Sohan', N. O. Mel'nik-Kagljak, L. F. Golovko*. – № u201503078 ; zajavl. 03.04.2015; opubl. 10.03.2016, Bjul. № 5. **2.** *Affatato S., Goldoni M*. at al. Mixed oxides prosthetic ceramic ball heads. Part 3: effect of the ZrO2 fraction on the wear of ceramic on ceramic hip joint prostheses. A long-term in vitro wearstudy / Biomaterials 22 (2001) 717-723. **3.** *Affatato S., Testoni M.* at al. Mixed oxides prosthetic ceramic ball heads. Part 1: effect of the ZrO2 fraction on the wear of ceramic on polyethylene joints / Biomaterials 20 (1999) 970-975. **4.** Pat. 105064 Ukraïna, MPK A61F2/32(2006.1) Sposib vigotovlennja golovki endoproteza kul'shovogo suglobu./ *S. V. Sohan', N. O. Mel'nik-Kagljak, L. F. Golovko*. – № u201503078 ; zajavl. 03.04.2015; opubl. 10.03.2016, Bjul. № 5. **5.** *Lan T. S., Hsu K. S.* The implementation of optimum MRR on digital PC-based lathe system / Int J Adv Manufact Technol, 35(3-4) (2007) 248-254. **6.** *Yazar Z., Koch K. F.* Feedrate optimization based on cutting force calculations in 3-axis milling of dies and molds with sculptured surfaces / Int J Mach Tool Manufact, 34(3) (1994) 365-377. **7.** Baek D. K., Ko T. J. at al. Chip volume prediction using a numerical control verification model / Int J Mach Tool Manufact. 46(12-13) 1326-1335. **8.** *Liu X. W., Cheng K.* Improved dynamic cutting force model in ball-end milling. Part I: theoretical modeling and experimental calibration / Int J Adv Manufact Technol, 26(5) (2005) 457-465. **9.** *Taunsi N., Elbestawi M. A.* Optimized feed scheduling in three axes machining. Part I: fundamentals of the optimized feed scheduling strategy / Int J Mach Tool Manufact. 43 (2003) 253-267. **10.** *Li Z. Z., Zhang Z.* H. Feedrate optimization for variant milling process based on cutting force prediction / Int J Adv Manufact Technol. 24(7-8) 541-552. **11.** *Affatato S., Goldoni M*. at al. Mixed oxides prosthetic ceramic ball heads. Part 2: effect of the ZrO2 fraction on the wear of ceramic on ceramic joints / Biomaterials 20 (1999) 1925-1930. **12.** *Della Valle A.* G. Wear of a highly cross-linked polyethylene liner associated with metallic deposition on a ceramic femoral head / J. Arthroplasty 4 19 (2004) 532-536. **13.** *Hernigou P., Zilber S.* at al. Ceramic-ceramic bearing decreases osteolysis: A 20-year study versus ceramic-polyethylene on the contralateral hip / Clin. Orthop. 9 467 (2009) 2274-2280. **14.** *Capello W. N*. et al Ceramiic-on-ceramic total hip arthroplasty: update / J. Arthroplasty. 7 23 (2008) 39-43. **15.** Clarke I. C., Gustafson A. Clinical and hip simulator comparisons of ceramic-on-polyethylene and metal-on-polyethylene wear / Clin. Orthop. Relat Res. 379 (2000) 34-40. **16.** *McKellop H.* Bearing surfaces in total hip replacements: State of the art and future developments / Instr. Course Lect. (2007) 83-97. **17.** *Heisel C., Silva M.* at al. Short-term in vivo wear of cross-linked polyethylene / J. Bone Joint. Surg. 4 86-A (2004) 748-751. **18.** *Heisel C., Silva M. at al.* Bearing surface options for total hip replacement / Instr. Course Lect. Hip. (2007) 103-119. **19.** *Dowson D,* New joints for the Millennium: Wear control in total replacement hip joints / Proc. Inst. Mech. Eng. H. 215 (2001) 335-358.

УДК 621.9.048

А.В. МИЦЫК, канд. техн. наук,
В.А. ФЕДОРОВИЧ, д-р техн. наук, Харьков, Украина

АНАЛИТИКА, КОММЕНТАРИИ И КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОТДЕЛОЧНО-ЗАЧИСТНОЙ ВИБРООБРАБОТКИ, СОЗДАННЫХ КОМБИНИРОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Наведено аналітику наукових основ механізму оздоблювально-зачищувальної обробки. Встановлено головний принцип проектування нових технологій, що складається в комбінуванні різних схем енергетичного впливу на робоче середовище і оброблювані деталі. Наведено класифікацію технологій оздоблювально-зачищувальної віброобробки. Дано схеми і енергетичні режими реалізації технологій, а також коментарі до конструкцій агрегатірванних віброверстатів, вказані області та особливості їх промислового застосування.
Ключові слова: оздоблювально-зачищувальна обробка, класифікація технологій

Приведена аналитика научных основ механизма отделочно-зачистной обработки. Установлен главный принцип проектирования новых технологий, состоящий в комбинировании различных схем энергетического воздействия на рабочую среду и обрабатываемые детали. Приведена классификация технологий отделочно-зачистной виброобработки. Даны схемы и энергетические режимы реализации технологий, а также комментарии к конструкциям агрегатированных вибростанков, указаны области и особенности их промышленного применения.
Ключевые слова: отделочно-зачистная обработка, классификация технологий

Scientific bases of finishing treatment mechanism analyzed. New technologies design main principle, which consists in combination of various energy impact schemes on working environment and workpieces is set. Vibration finishing treatment technology classification is set. Scheme and energy modes by technologies implementation and comments to aggregated vibration machine-tool constructions are given, areas and industrial implementation characteristics are set.
Keywords: finishing treatment, technology classification

Общие положения

Анализируя научные основы механизма отделочно-зачистной виброобработки становится очевидным, что суть рассматриваемого процесса заключается в том, что помещенные в колеблющийся резервуар вибростанка гранулы свободной абразивной среды и обрабатываемые детали совершают циркуляционное движение с различными скоростями и траекториями [1].

Как результат, при относительном перемещении и взаимном давлении гранул и деталей происходят динамические процессы микрорезания и упругопластического деформирования, вызывающие удаление дефектного слоя металла с обрабатываемой поверхности и одновременное уменьшение высоты ее микронеровностей [2].

© А.В. Мицык, В.А. Федорович,2016

Кинематическим началом циркуляционного движения содержимого резервуара вибростанка является силовое взаимодействие его рабочих поверхностей, то есть стенок и днища, с абразивной средой различной характеристики и состава, и обрабатываемыми деталями. Материал деталей различается по своему химическому составу и физико-технологическим свойствам. Характеристика среды по физическим, химическим и механическим свойствам также может изменяться в широком диапазоне. Режимы движения резервуара и его содержимого при обработке деталей варьируются, как и другие параметры технологии [3].

Главным принципом проектирования новых технологий отделочно-зачистной виброобработки, которые активно исследуются и внедряются в современном промышленном производстве для изготовления широкой номенклатуры деталей и изделий, является принцип комбинирования различных схем энергетического воздействия на рабочую среду и обрабатываемые детали (рис. 1), загружаемые в резервуар вибростанка для проведения обработки с получением требуемого технологического результата [2, 4].

Комбинируя различные сочетания схем энергетического воздействия, а также конструкторских и технологических параметров, возможно значительно расширить область эффективного использования отделочно-зачистной виброобработки на основе создания новых технологий, а также прогрессивного оборудования для их реализации.

Хотелось бы отметить, что некоторые первые шаги для развития мировой практики виброобработки в этом направлении уже сделаны, в том числе авторами настоящей статьи и данные исследования продолжают расширяться, что должно принести отечественному машиностроению несомненную научную и экономическую выгоду на рынке новых инженерных открытий, а также промышленных технологий и металлорежущих станков.

Далее, в последовательности предложенной классификации (см. рис. 1) проведем аналитический анализ и сделаем некоторые комментарии к технологиям отделочно-зачистной виброобработки с различными схемами энергетического воздействия.

Механохимическая технология отделочно-зачистной виброобработки

Наиболее характерным для механохимического воздействия является использование в технологических процессах виброобработки химически-активных растворов различного количественного и качественного составов.

Интенсификации технологий виброобработки происходит при химическом воздействии активных компонентов раствора на поверхность обрабатываемой детали и адсорбционного воздействия поверхностно-

активных веществ в местах наибольшего контакта гранул и деталей, то есть на их кромках и выступах поверхности.

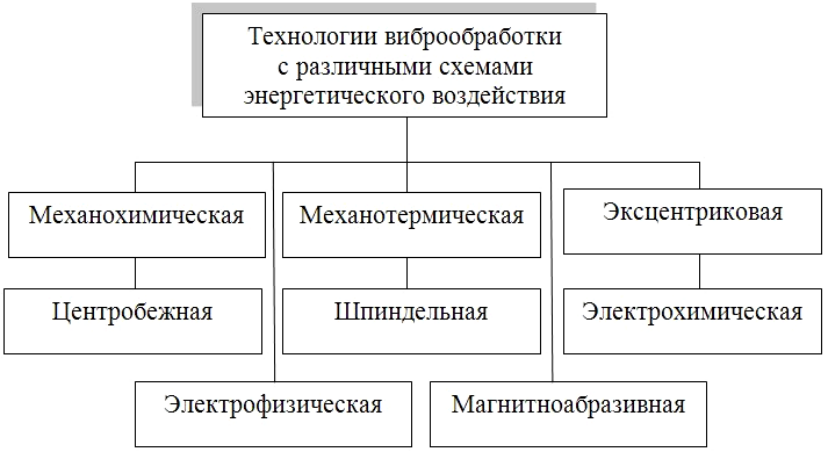


Рисунок 1 – Классификация технологий отделочно-зачистной виброобработки с различными схемами энергетического воздействия

Химическое воздействие применяемого в технологии виброобработки химически-активного раствора основано на гетерогенном процессе электрохимического и химического растворения материала поверхностного слоя в электролите.

Химическое растворение происходит в результате реакций, возникающих между материалом детали и действующим компонентом химически-активного раствора. Электрохимическое растворение происходи вследствие наличия в системе «деталь-электролит» различных микродефектов, так как металл детали не является химически чистым и однородным.

Химическое воздействии раствора наиболее интенсивно проявляется на свежее деформированных участках поверхности, которые постоянно имеют место вследствие из-за ударного гранул воздействия рабочей среды. Такие участки свободны от жировых пленок и загрязнений, и имеют неравновесную структуру поверхностного слоя с повышенной энергией и скоплением дислокаций. Химически-активный раствор проникает вглубь металла детали по микротрещенам, проводя его растравливание и тем самым облегчая механический абразивный съем гранулам рабочей среды.

В процессе электрохимического растворения происходит взаимодействие макрокомпонентов поверхностных слоев детали, изначально окисных пленок, затем пленок соединений металла и поверхностно-активного

вещества с химически-активным раствором. В результате происходит растворение основного металла детали и частичное стравливание его соединений. Этот процесс протекает избирательно, главным образом на выступах и кромках деталей, создавая технологические предпосылки для удаления заусенцев, скругление острых кромок, а также сглаживание микронеровностей в процессе отделочно-зачистной виброобработки.

Механотермическая технология отделочно-зачистной виброобработки

Характеризуется наложением на процесс классической виброобработки регулируемого температурного поля, что позволяет комплексно воздействовать на обрабатываемые поверхности сочетанием низкочастотных колебаний, наклепа и нагрева до 150…500 °С (рис. 2). При таких условиях осуществляются операции упрочняющей, стабилизирующей, а также некоторых видов термической обработки и покрытий [5, 6].

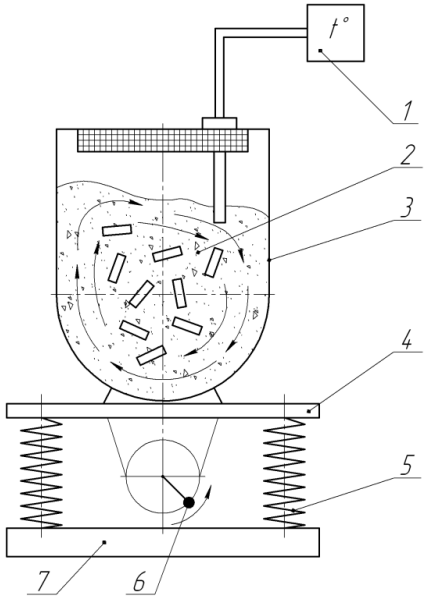


Рисунок 2 – Схема процесса механотермической виброобработки:
1 – нагревательное устройство; 2 – рабочая среда; 3 – резервуар;
4 – виброплатформа; 5 – упругая подвеска; 6 – вибровозбудитель; 7 – основание

Конструкции вибростанков для механотермической виброобработки имеют различные варианты разогрева загрузки 2 резервуара 1, состоящей из рабочей среды и обрабатываемых деталей, а именно, при помощи: электронагревателей 5, вынесенных из зоны вибрации (рис. 3, а) или вмонтированными в стенки резервуара 1 (рис. 3, б); электромагнитного поля, создаваемого многовитковым индуктором 6 (рис. 3, в) или одновитковым индуктором 7 (рис. 3, г); пропусканием электрического тока (рис. 3, д) или газообразного теплоносителя (рис. 3, ж) сквозь загрузку 2 резервуара 1; циркуляцией жидкого или газообразного теплоносителя в резервуаре 1 (рис. 3, е) или над загрузкой 2 резервуара 1 (рис. 3, з). В качестве рабочей среды используются стальные или твердосплавные шары, а также абразивные гранулы [7].

Совмещение механического и температурного воздействия способствует интенсификации процессов, связанных с образованием требуемых физико-механических свойств поверхностного слоя детали и повышением качества, наносимых в процессе обработки механических покрытий.

Процесс механотермической виброобработки реализуется на специальных вибростанках, имеющих резервуар с нагревательными элементами и теплоизоляцией.

Эксцентриковая технология отделочно-зачистной виброобработки

Имеет сходство с базовой схемой виброобработки. Однако, кинематические особенности, состоящие в относительно высоких значениях амплитуды, а также широкий диапазон траектории колебания от окружности до вытянутого эллипса расширяют технологические возможности этого процесса обработки [2, 6, 8].

Сущность процесса эксцентриковой виброобработки (рис. 4) состоит в том, что от привода 7 через вал 6, имеющий эксцентриситет и вращающийся вокруг своей оси, сообщается движение платформе 5, которая шарнирно закреплена в точке *В* на качающейся подвеске 1 в виде серьги. Противоположный конец платформы 5, на котором смонтирован резервуар 2, описывает сложную траекторию, зависящую от взаимного расположения осей, проходящих через точки *О, В, Д* кинематической связи. Траектория перемещения резервуар изменяется от приближенных концентрических окружностей до эллипсов с различными соотношениями осей. Частота колебаний резервуара имеет широкий диапазон регулирования и составляет 300…1800 кол/мин [6].

При реализации схемы эксцентриковой виброобработки представляется возможность управления перемещением резервуар 2, в результате чего можно зафиксировать траекторию движения любой его точки, а следовательно рассчитать скорости и ускорение движения.

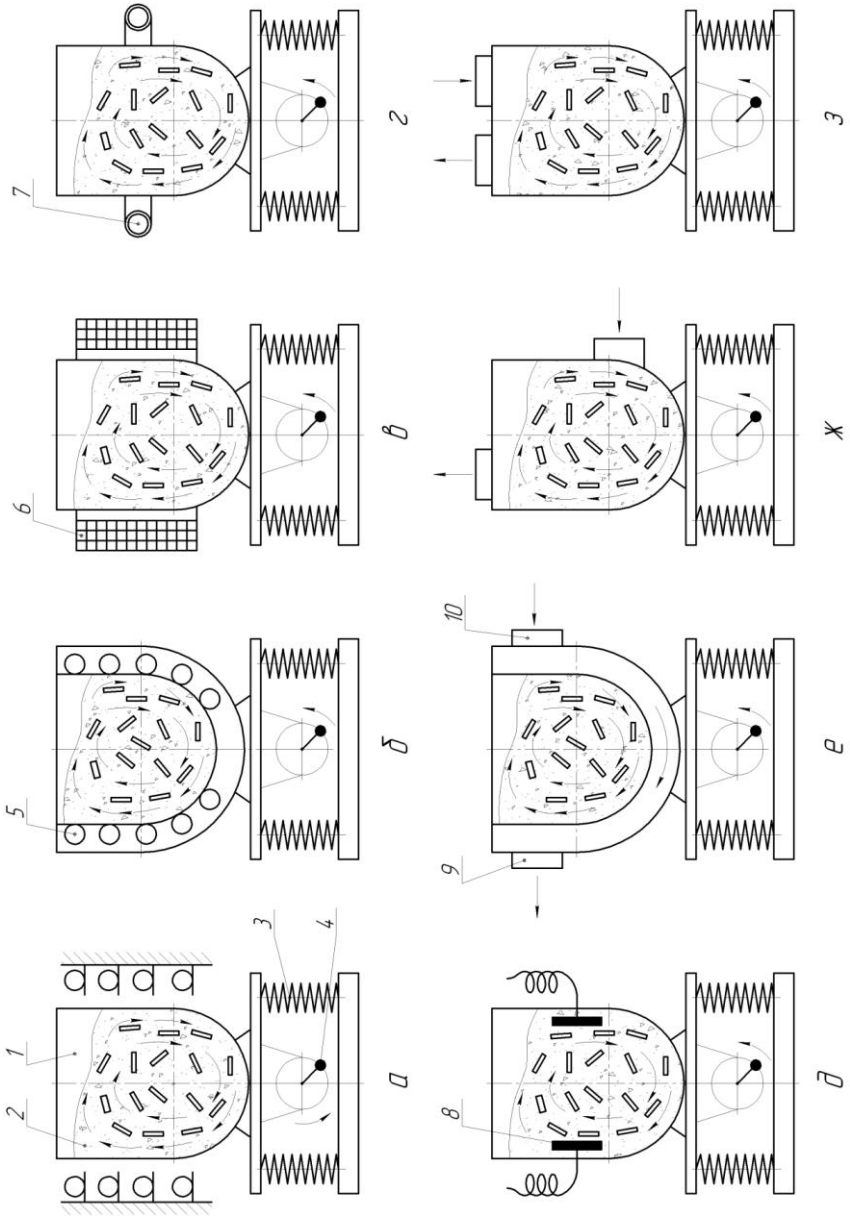


Рисунок 3 – Схема резервуаров вибростанков для механотермической виброобработки

Амплитуду колебаний резервуара 2 изменяют от 0 до 40 мм различными путями, а именно варьируя величиной эксцентриситета, соотношением величины плеч платформы *AB* и *BC*, а также расположением неподвижных осей, проходящих через точки *B* и *Д* качающейся подвески 1.

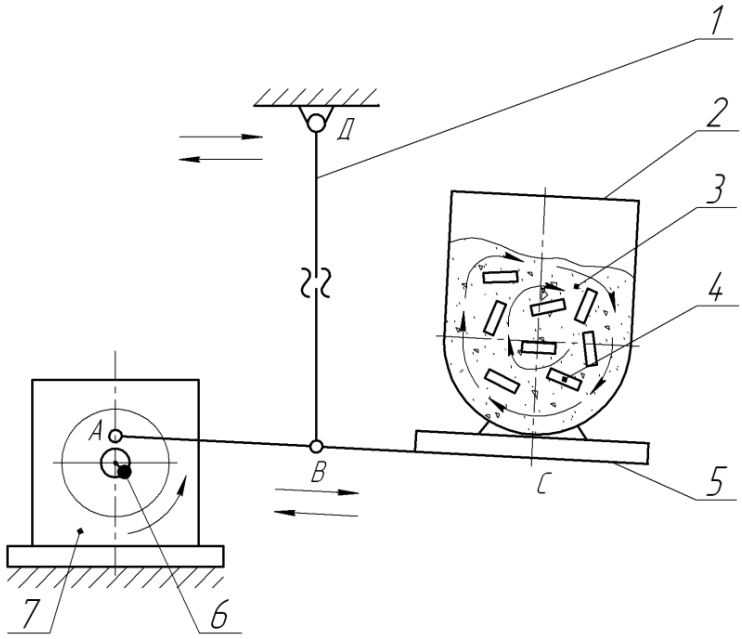


Рисунок 4 – Схема процесса эксцентриковой виброобработки:
1 – подвеска; 2 – резервуар; 3 – рабочая среда; 4 – обрабатываемые детали;
5 – платформа; 6 – эксцентрик; 7 – привод

Изменение технологических параметров процесса эксцентриковой виброобработки, таких как амплитуда, частота и траектория движения резервуара, оказывает существенное влияние на кинематику и динамику рабочей среды, загруженный в резервуар. Возможность управления траекторией движения резервуара позволяет выбирать его необходимую форму применительно к конкретной операции виброобработки [9].

Центробежная технология отделочно-зачистной виброобработки

В основу процесса положено одновременное воздействие направленных колебаний и центробежных сил, которое приводит к росту энергетического уровня рабочей среды и интенсивности виброобработки в целом [10, 11].

Сущность процесса центробежной виброобработки (рис. 5) состоит в том, что резервуар 1, снабженный механизмом вертикального перемещения 2, шарнирно установлен в поворотном кольце 3 и приводится в сложное колебательное движение с помощью привода. Механизм привода через кривошип 5 задает точке *C* водила 4 вращательное или плоскопараллельное движение, которое при помощи корданной подвески преобразуется в двухкомпонентные угловые колебания резервуара. Конструктивные особенности корданной подвески резервуара обеспечивают надежную работу вибростанка с амплитудой угловых колебаний β и α_1 в пределах 15 градусов [12].

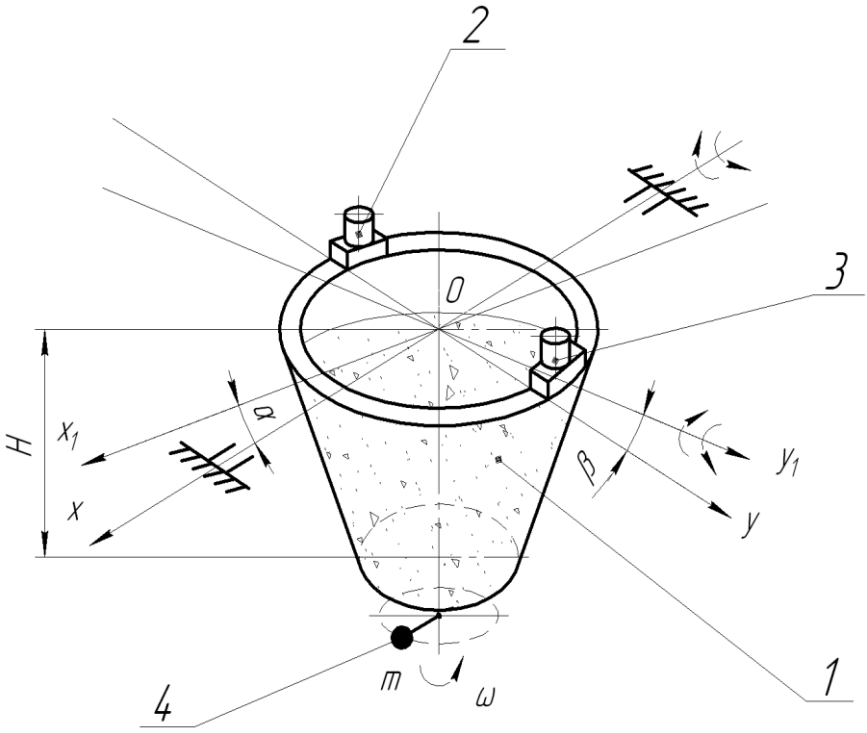


Рисунок 5 – Схема центробежной виброобработки:
1 – резервуар; 2 – механизм вертикального перемещения;
3 – поворотное кольцо; 4 – вибровозбудитель

К основным параметрам, характеризующим процесс центробежной виброобработки относятся скорость и ускорение движения гранул рабочей среды, а также сила их микроударов о поверхности обрабатываемых деталей.

Шпиндельная технология отделочно-зачистной виброобработки

Представляет собой комбинирование традиционной схемы виброобработки и схемы установки одной или пакета обрабатываемых деталей на одном или нескольких шпинделях, сообщающих деталям главное движение (рис. 6). В зависимости от формы и сложности поверхности, обрабатываемых деталей, а также от требуемого технологического результата виброобработки главное движение может быть вращательным, возвратно-поступательным, осциллирующим, с угловыми колебаниями, а также комбинированным из всех перечисленных видов движения [13].

Процесс обработки осуществляется в колеблющейся рабочей среде находящейся в состоянии текучести, путем погружения в нее обрабатываемых деталей простой и сложной формы, которым сообщается дополнительное движение со скоростью 0,5…15 м/с.

В качестве рабочей среды используют шлифпорошки, мелкодесперсные абразивные и металлические гранулы в виде стеклянных и стальных шаров, а также чугунной дроби.

Технологический результат шпиндельной виброобработки достигается при сочетании процессов микрорезания и поверхностного пластического деформирования. Независимые и комплексные движения деталей и рабочей среды обеспечивают обработку всех поверхностей деталей на которой образуется специфический характер микрорельефа.

Формирование параметров качества поверхности детали происходит пи влиянии таких факторов, как зернистость и увлажненность абразива, амплитуда и частота колебаний резервуара, окружная скорость вращения детали, продолжительность обработки, исходная шероховатость и физико-механические свойства материала обрабатываемой детали.

Шпиндельная виброобработка обеспечивает получение поверхностей до $R_a = 0{,}16$ мкм. Амплитуда колебаний резервуара и в меньшей степени частота оказывают влияние на изменение шероховатости поверхности. Рост частоты и амплитуды колебаний резервуара сопровождается соответствующим увеличением весового съема металла, который также зависит от увлажненности гранул мелкодисперсной рабочей среды и достигает максимума при влажности гранул 10…12 %.

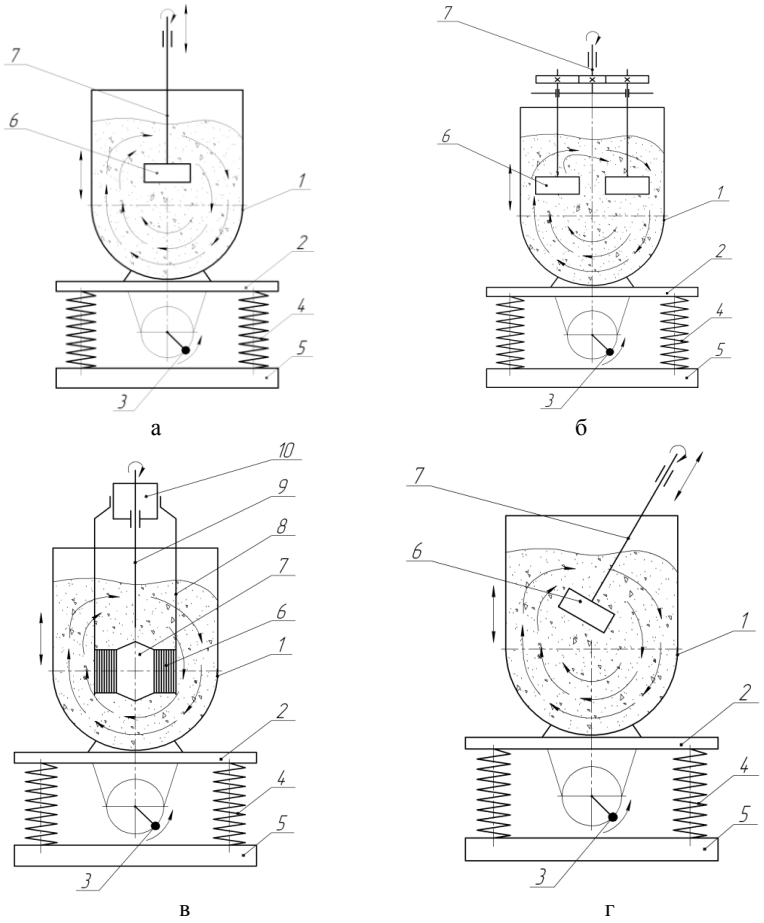


Рисунок 6 – Схемы установки обрабатываемых деталей
при шпиндельной виброобработке: 1 – резервуар; 2 – виброплатформа;
3 – вибровозбудитель; 4 – упругая подвеска; 5 – основание;
6 – обрабатываемая деталь; 7 – шпиндель; 8 – крепежное приспособление;
9 – инструмент; 10 – пиноль

Электрохимическая технология отделочно-зачистной виброобработки

Основана на эффекте электрохимического растворения поверхностного слоя обрабатываемой детали и механическом разрушении ее материала с последующим удалением отходов [6].

Принципиальная схема вибростанка для электрохимической обработки (рис. 7) состоит из резервуара 4, смонтированного на упругой подвеске 2 и установленного на основании 1. Под действием вибровозбудителя 3, резервуар 4 совершает колебательные движения с частотой 15…50 Гц и амплитудой 0,5…5,0 мм. Внутри резервуара 4 установлены электроды 5 и 6, подключенные к источнику постоянного тока 7. Корпус резервуара защищен облицовкой 8. Подача электролита осуществляется из бака 10 насосом 9 [7].

Сущность процесса электрохимической виброобработки состоит в том, что обрабатываемые детали и рабочую среду помещают в пространство между электродами. Под действием электрического тока с плотностью 0,1…0,5 А/см^2 и напряжением 30 В, а также электролита на поверхности детали образуется пленка с высоким сопротивлением, прочность которой меньше прочности материала детали. В результате вибрационного воздействия гранулы среды разрушают оксидную пленку и удаляют с поверхности детали дефектный слой.

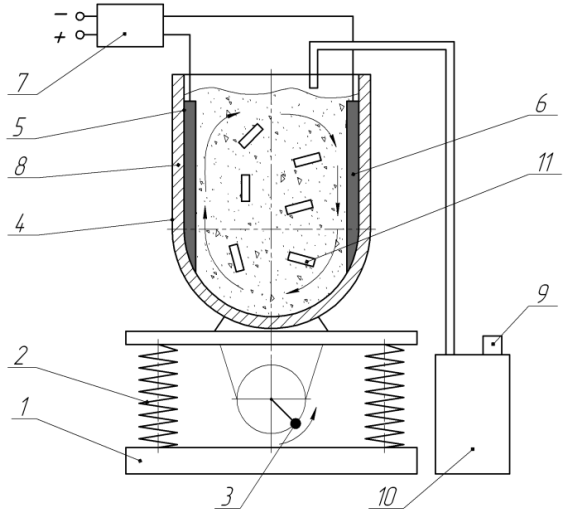


Рисунок 7 – Схема электрохимической виброобработки: 1 – основание; 2 – упругая подвеска; 3 – вибровозбудитель; 4 – резервуар; 5, 6 – электроды; 7 – источник тока; 8 – облицовка; 9 – насос; 10 – бак; 11 – обрабатываемые детали

В качестве электролитов используются растворы на основе нейтральных солей, таких как хлористый натрий, азотнокислый или азотистокислый натрий и др. Интенсивность съема металла при электрохимической обработке в 6…10 раз выше в сравнении с традиционной виброобработкой. Процесс

наиболее эффективен на отделочно-зачистных операциях при обработке деталей из медных сплавов, а также жаропрочных и аустенитных сталей.

Электрофизическая технология отделочно-зачистной виброобработки

Характеризуется включением в электрическую цепь обрабатываемой детали и колеблющейся рабочей среды. Вследствие периодического отрыва колеблющихся гранул от поверхности обрабатываемой детали, в образующихся между ними зазорах возникают электрические разряды, которые в зависимости от параметров тока сопровождаются оплавлением контактных зон. При этом достигаются изменения физико-механических свойств материала поверхностного слоя детали, а также перенос частиц материала гранул на поверхность обрабатываемых деталей.

Схема процесса электрофизической виброобработки (рис. 8) заключается в том, что обрабатываемая деталь 1 и гранулы рабочей среды 2, выполненные из высокопрочного чугуна помещены в резервуар3, оснащенный дебалансным вибровозбудителем 4. Резервуар 3 с помощью упругой подвески 5 установлен на основании 6. Трансформатор 7 своими выводами через электрический прерыватель 8 соединен с корпусом резервуара 3 и держателем 9 детали 1 [2].

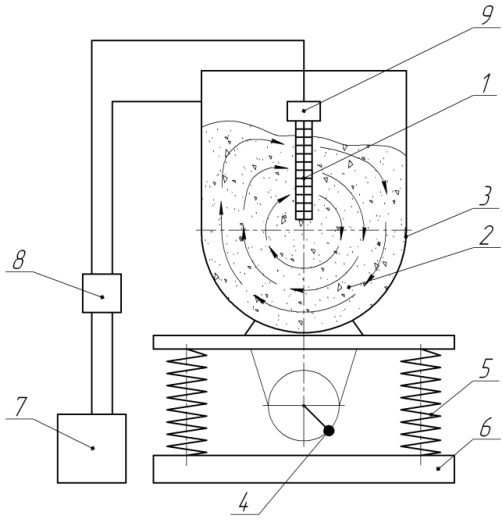


Рисунок 8 – Схема электрофизической виброобработки: 1 – обрабатываемая деталь; 2 – рабочая среда; 3 – резервуар; 4 – вибровозбудитель; 5 – упругая подвеска; 6 – основание; 7 – трансформатор; 8 – прерыватель; 9 – держатель

Предварительно разогретую деталь 1 устанавливают в держатель 9, который через токоизолирующие прокладки крепится крепиться на корпусе резервуара 3. При включении вибровозбудителя 4, рабочая среда 2 переходит в псевдоожиженное состояние и ее гранулы наносят периодические удары по поверхности детали.

При наложении электрического потенциала в момент соударения между деталью 1 и каждой из отдельных гранул рабочей среды 2 возникает высокотемпературный дуговой разряд, который способствует переносу микрочастиц материала гранул на поверхность детали. При снятии электрического потенциала происходит отрыв от поверхности детали 1 отдельных налипших гранул рабочей среды 2 и обрабатываемая поверхность очищается от шлаковых включений.

Магнитноабразивная технология отделочно-зачистной виброобработки

Применение целесообразно при чистовой отделочно-зачистной обработке деталей сложных форм с повышенными требованиями к качеству и точности поверхности [2]. Схема процесса (рис. 9) состоит в том, что рабочая среда 3 циркулирует в резервуаре 1 под действием колебаний, создаваемых вибровозбудителем 5, прикрепленным к виброплатформе 4, а обрабатываемые детали 2 ориентируются вдоль магнитных силовых полей. Резервуар 1 выполняется из диамагнитного материала, полюсы электромагнитов 6 обращенные к резервуару 1 получают разноименную намагниченность, а магнитные силовые линии проходят через содержимое резервуара 1 в направлении от одного полюса к другому. Детали 2, помещенные в межполюсное пространство электромагнитов 6, ограниченное резервуаром 1 занимают в нем устойчивое равновесное положение.

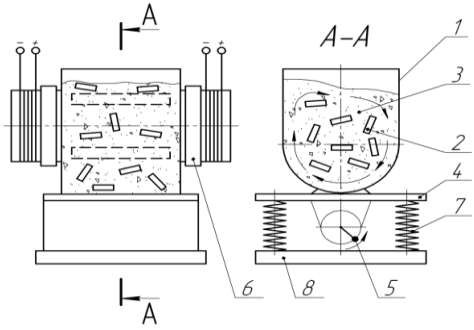


Рисунок 9 – Схема магнитно-абразивной виброобработки:
1 – резервуар; 2 – обрабатываемые детали; 3 – рабочая среда; 4 – виброплатформа;
5 – вибровозбудитель; 6 – полюсы электромагнитов; 7 – упругая подвеска;
8 – основание

Магнитно-абарзивная виброобработка в диэлектрической среде представляет собой совокупность импульсных процессов микрорезания и пластического деформирования поверхностного слоя детали, расположением и движением которых можно управлять с помощью магнитного поля.

Выводы

Непрерывное совершенствование технологий отделочно-зачистной обработки, научный и производственный поиск путей их интенсификации и расширение технологических возможностей требует изучения, создания и промышленного внедрения новых разновидностей высокоэффективных методов формирования поверхностей деталей. Вибрационные технологии и оборудование решая эти задачи с точки зрения получения требуемого результата по своему физическому содержанию существенно отличаются от традиционных методов обработки. Причем такой нетрадиционный подход позволяет создавать новые, мультиэнергетические технологии и процессы обработки, характеризующиеся высокой эффективностью, оригинальными качественными показателями, а также способствующие проектированию экологически чистых ресурсосберегающих технологий.

Список использованных источников: **1.** *Карташов И.Н.* Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах / И.Н. Карташов, М.Е. Шаинский, В.А. Власов. – Киев: Вища школа, 1975. –188 с. 2. *Бабичев А.П.* Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев – Ростов-на-Дону, 2008. – 694 с. **3.** *Кулаков Ю.М.* Отделочно-зачистная обработка деталей / Ю.М. Кулаков, В.А. Хрульков. – М: Машиностроение, 1979. – 216 с. **4.** *Мицык А.В.* Пути интенсификации вибрационной отделочно-зачистной обработки комбинированием схем энергетических воздействий на рабочую среду и детали / А.В. Мицык, В.А. Федорович // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2011. – № 6 (83). – С. 26 – 34. **5.** *Берещенко А.А.* Виброхимическая обработка углеродистых и легированных сталей: дис. … кандидата хим. наук: 05.17.03 / Алла Александровна Берещенко. – Киев, 1980. – 132 с. **6.** *Григорьев В.А.* Интенсификация процессов виброабразивной обработки наложением электрохимического воздействия: автореф. дис. … канд. техн. наук / Григорьев Виталий Анатольевич. – Ростов-на-Дону, 1988. – 17 с. **7.** *Бабичев А.П.* Наладка и эксплуатация станков для вибрационной обработки / А.П. Бабичев, Т.Н. Рысева, В.А. Самодуров, М.А. Тамаркин. – М.: Машиностроение, 1988. – 64 с. **8.** *Бабичев А.П.* Совершенствование конструкции рабочих камер вибрационных станков / А.П. Бабичев, Т.Н. Рысева, Т.В. Давыдова, Саед Бакир Аля // Вибрации в технике и технологиях. – 1995. – №1 (2). – С. 8 – 11. **9.** *Балакин И.Я.* Эффективность различных способов очистки отливок / И.Я. Балакин, Б.Б. Гуляев, Ю.Ф. Боровский, С.И. Фомченко // Вестник машиностроения. – 1967. – № 3. **10.** *Афтаназив И.С.* Разработка и внедрение технологического процесса поверхностного упрочнения деталей вращения вибрационно-центробежным методом: автореф. дис. … канд. техн. наук / Иван Семенович Афтаназив. – Москва, 1984. – 19 с. **11.** *Повидайло В.А.* К определению эффективности параметров процесса вибрационно-центробежной упрочняющей обработки зубчатых колес / В.А. Повидайло, И.С. Афтаназив, Ю.М. Семкив // Вибрации в технике и технологиях. – 1995. – №1 (2). – С. 35 - 38. **12.** *Бабичев А.П.* Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей (очистка, мойка, удаление облоя и заусенцев, обработка кромок) / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, Л.К. Гиллеспи. Р-н-Д: ДГТУ. – 2010. – 289 с. **13.** *Зверовщиков А.В.* Совершенствование шпиндельной технологии обработки деталей при уплотнении шлифовального материала внешним давлением: дис. … канд. техн. наук: 05.02.08 / Анатолий Владимирович Зверовщиков. – Пенза, 2004. – 270 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Kartashov I.N*. Obrabotka detalej svobodnymi abrazivami v vibrirujushhih rezervuarah / *I.N. Kartashov, M.E. Shainskij, V.A. Vlasov*. – Kiev: Vishha shkola, 1975. – 188 s. **2**. *Babichev A.P*. Osnovy vibracionnoj tehnologii / A.P. Babichev, I.A. Babichev – Rostov-na-Donu, 2008. – 694 s. **3**. Kulakov Ju.M. Otdelochno-zachistnaja obrabotka detalej / *Ju.M. Kulakov, V.A. Hrul'kov*. – M: Mashinostroenie, 1979. – 216 s. 4. *Micyk A.V*. Puti intensifikacii vibracionnoj otdelochno-zachistnoj obrabotki kombinirovaniem shem jenergeticheskih vozdejstvij na rabochuju sredu i detali / *A.V. Micyk, V.A. Fedorovich* // Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologija. – 2011. – № 6 (83). – S. 26 – 34**. 5.** *Bereshhenko A.A.* Vibrohimicheskaja obrabotka uglerodistyh i legirovannyh stalej: dis. … kandidata him. nauk: 05.17.03 / *Alla Aleksandrovna Bereshhenko*. – Kiev, 1980. – 132 s. **6.** *Grigor'ev V.A.* Intensifikacija processov vibroabrazivnoj obrabotki nalozheniem jelektrohimicheskogo vozdejstvija: avtoref. dis. … kand. tehn. nauk / Grigor'ev Vitalij Anatol'evich. – Rostov-na-Donu, 1988. – 17 s. **7**. *Babichev A.P*. Naladka i jekspluatacija stankov dlja vibracionnoj obrabotki / *A.P. Babichev, T.N. Ryseva, V.A. Samodurov, M.A. Tamarkin*. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 64 s. **8**. Babichev A.P. Sovershenstvovanie konstrukcii rabochih kamer vibracionnyh stankov / A.P. Babichev, T.N. Ryseva, T.V. Davydova, Saed Bakir Alja // Vibracii v tehnike i tehnologijah. – 1995. – №1 (2). – S. 8 – 11. **9**. Balakin I.Ja. Jeffektivnost' razlichnyh sposobov ochistki otlivok / *I.Ja. Balakin, B.B. Guljaev, Ju.F. Borovskij, S.I. Fomchenko* // Vestnik mashinostroenija. – 1967. – № 3. **10**. Aftanaziv I.S. Razrabotka i vnedrenie tehnologicheskogo processa poverhnostnogo uprochnenija detalej vrashhenija vibracionno-centrobezhnym metodom: avtoref. dis. … kand. tehn. nauk / Ivan Semenovich Aftanaziv. – Moskva, 1984. – 19 s. **11.** *Povidajlo V.A*. K opredeleniju jeffektivnosti parametrov processa vibracionno-centrobezhnoj uprochnjajushhej obrabotki zubchatyh koles / *V.A. Povidajlo, I.S. Aftanaziv, Ju.M. Semkiv* // Vibracii v tehnike i tehnologijah. – 1995. – №1 (2). – S. 35 - 38. **12**. *Babichev A.P*. Primenenie vibracionnyh tehnologij na operacijah otdelochno-zachistnoj obrabotki detalej (ochistka, mojka, udalenie obloja i zausencev, obrabotka kromok) / *A.P. Babichev, P.D. Motrenko, L.K. Gillespi. R-n-D:* DGTU. – 2010. – 289 s. **13.** *Zverovshhikov A.V.* Sovershenstvovanie shpindel'noj tehnologii obrabotki detalej pri uplotnenii shlifoval'nogo materiala vneshnim davleniem: dis. … kand. tehn. nauk: 05.02.08 / *Anatolij Vladimirovich Zverovshhikov*. – Penza, 2004. – 270 s.

УДК 621.9(075.8)

В.В. СТУПНИЦЬКИЙ, д-р техн. наук,
А.М. КУК, канд. техн. наук, НУ «ЛП», Львів, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АНАЛІЗУ КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ВИРОБУ З ВРАХУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ

Механізм фретинг-корозії суттєво залежить від мікротопології та залишкового напружено-деформованого стану спряжених поверхонь. В статті наведена залежність відношення циклічної довговічності виробу на повітрі до довговічності в корозійному середовищі у деталях з попередньо деформованими поверхнями в результаті їх механічного оброблення. Доведено, що в результаті збільшення швидкості різання (більше 150 м/хв) та зменшення подачі (менше 0,1 мм), питома величина деформаційної складової мікронерівності збільшується, що сприяє зменшенню концентрації оксидних продуктів на функціональній поверхні деталі, в результаті чого корозійна стійкість підвищується
Ключові слова: фретинг-корозія, концентрація оксидних продуктів

Механизм фреттинг-коррозии существенно зависит от микротопологии и остаточного напряженно-деформированного состояния сопрягающихся поверхностей. В статье приведена зависимость отношения циклической долговечности изделия на воздухе к долговечности в коррозийной среде в деталях с предварительно деформированными поверхностями в результате их механической обработки. Доказано, что в результате увеличения скорости резания (свыше 150 м/мин) и уменьшения подачи (менее 0,1 мм), удельная величина деформационной составляющей микронеровности увеличивается, что способствует уменьшению концентрации оксидных продуктов на функциональной поверхности детали, в результате чего коррозийная стойкость повышается.
Ключевые слова: фреттинг-коррозия, концентрация оксидных продуктов

The mechanism of fretting corrosion substantially depends from the microtopology and residual tensely-deformed state of the conjugate surfaces. In the article dependence of relation of cyclic product life in the wild to product life in a corrosive environment in parts with the preliminary deformed surfaces as a result of their machining is written. It is well-proven that as a result of increase of speed of cutting (over 150 m/min) and reduction of feed (less 0,1 mm), the specific size of deformation component of the roughness increases, that assists reduction of concentration of oxide products on the functional surface of part, corrosion resistance rises as a result.
Keywords: fretting corrosion, concentration of oxide products

Експлуатаційні характеристики деталей машин і механізмів визначаються в основному, властивостями поверхневих шарів деталі, оскільки усі процеси руйнування, особливо при циклічному навантаженні починаються, як правило, з поверхні і залежать від її будови і фізико-хімічного стану. Роль характеру недосконалості функціональної поверхні істотно зростає при корозійній втомі, оскільки вона спричинює руйнування захисних бар'єрних плівок, що знижують швидкість корозії за відсутності напружень, а також концентрацією специфічного виду напружень, що

© В.В. Ступницький, А.М. Кук, 2016

спричинюються пошкодженнями в результаті виникнення на поверхні корозійних каверн.

Щодо впливу технологічних чинників на корозійну стійкість матеріалу, слід окремо розглянути процеси фретинг- та електроемісійної корозії. У кожному з цих процесів прояв мікрогеометричних та залишково-деформаційних чинників створює відповідні умови інтенсивності прояву корозійних явищ при специфічних умовах експлуатації виробів.

Механізм фретинг-корозії достатньо описаний в технічній літературі [1], проте формалізація інтенсивності механіко-хімічних процесів, а особливо їх залежність від мікротопології та залишкового напружено-деформованого стану спряжених поверхонь вивчена недостатньо [1,2]. При спряженні двох поверхонь контакт відбувається не по всій площі, а лише на відносно невеликому числі виступів мікронерівності. В результаті ковзання поверхонь однієї відносно іншої, нерівності однієї поверхні стирають нерівності протилежної і утворюється гладкий слід. У міжповерхневому проміжку адсорбується газ або відбувається окислення спряжених поверхонь. Подальші переміщення мікровиступів руйнують оксидну плівку. Вони можуть також механічно активувати реакцію адсорбції кисню на металі і сприяти утворення оксиду, який, у свою чергу, також стирається. Це і є механізм формування хімічної складової руйнування при фретинг-корозії. Зменшення мікронерівностей профілю внаслідок корозійного зношування формує механічну складову руйнування.

Крім того, деякі вчені [1] вказують також на динамічну складову фретинг-руйнування. Мікрочастинки металу, що відірвалися від суцільної маси виробу, являють собою високоміцні кристали оксиду металу з гострими виступами і виступають в ролі абразивної суспензії при контактній взаємодії рухомих деталей. З іншої сторони, зношування поверхонь сприяє зростанню віддалі між спряженими поверхнями, що, в свою чергу, впливає на те, що низький спочатку електричний опір між поверхнями стає високим. Проте, ця динамічна складова у значній мірі залежить від конструктивного виконання системи змащування і регенерації мастила та потребує додаткового опрацювання.

При протіканні фретинг-корозії з постійною швидкістю показники корозійної стійкості в об'ємному (1) або лінійному (2) еквіваленті визначають по формулах:

$$\tau_m = \frac{\Delta m}{v_m}, \tag{1}$$

$$\tau_l = \frac{\Delta l}{v_l} \tag{2}$$

де τ_m - час до зменшення маси на одиницю площі на допустиму величину Δm; v_m - швидкість зменшення маси внаслідок фретинг-

корозійного руйнування поверхонь деталі, кг/м^2; τ_l - час проникнення фретинг-корозії на допустиму (задану) глибину Δl; v_l - лінійна швидкість корозії.

Як і для розрахунку контактних деформацій, необхідно класифікувати мікроспряжені поверхні за геометричною формою у відповідності до форми змодельованих мікронерівностей, отриманих в результаті векторної суми геометрико-кінематичної, вібраційної та деформаційної складової [5]. В даному випадку приймаємо моделювання взаємодії сферичної поверхні і пластичного площинного півпростору, що вирішується за алгоритмом А.Ю. Ішлінського [3]. Крім того, при моделюванні трибоконтакту з урахуванням параметрів мікротопології поверхонь площі мікрононтакту поверхонь повинні бути змінені, приймаючи до уваги необхідність формалізації еквівалентної поверхні у відповідності до моделі Демкина [3,4].

При терті мікровиступи лінійно рухаються по плоскій поверхні металу зі швидкістю υ, причому кожен з них оголяє поверхню чистого металу і пророблює борозну з усередненою глибиною (Rpk_{ekv}+Rk_{ekv}). Після проходження мікровиступу на зруйнованій поверхні у відбувається швидка адсорбція атмосферного газу, яка з часом супроводжується утворенням тонкої оксидної плівки. Наступний мікровиступ, рухаючись по тій же борозні, знову руйнує і видаляє оксидне нашарування, залишаючи за собою оголений метал. Окислення відбувається за середній час t. Процес окислення відповідає логарифмічному закону [1]:

$$\Delta m = (Rpk_{ekv} + Rk_{ekv}) \cdot l \cdot k_o \cdot \ln\left(\frac{t}{\tau} + 1\right) \tag{3}$$

де k_o, τ - константи.

Слід також взяти до уваги, що окисленню передує швидка фізична адсорбція кисню, за якою з меншою швидкістю йде хемосорбція атомів кисню. Хемосорбований кисень, у свою чергу, взаємодіє з металом з утворенням оксиду металу. Ця реакція механічно активується при русі мікронерівностей по поверхні металу. Кількість оксиду, яка утворюється в результаті такого процесу, лімітується хемосорбцією. Швидкість хемосорбції відповідає рівнянню, ідентичному за формою рівнянню (3) [1]. Отже, який би процес не переважав, вид кінцевого виразу залишається по суті однаковим. До цього аргументу можна і не прибігати, оскільки логарифмічний член можна розкласти в ряд і оперувати далі тільки першим членом ряду. Він відповідає лінійній залежності швидкості окислення або адсорбції газу від часу. Лінійна залежність швидкості адсорбції газу вказує, що кількість кисню, присутня на чистій металевій поверхні у вигляді фізично адсорбованого газу,

можна реально контролювати, на відміну від процесу переходу атомів кисню в хемосорбований стан.

Приймаючи до уваги всі чинники фретинг-корозії, можна записати рівняння втрати маси деталі при $n_ц$ циклах тертя:

$$\Delta m = \left(k_{o1} \cdot \sqrt{N} - k_{o2} \cdot N\right) \cdot \frac{n_ц}{\varsigma} + k_{o3} \cdot \eta \cdot n_ц \cdot N \tag{4}$$

де k_{o1}, k_{o2} - константи, що характеризують фізичну адсорбцію та хемосорбцію атомів кисню [1];

N - навантаження, що визначається як

$N = K_3 \cdot \alpha \cdot t_m \cdot A_c \cdot B \cdot \varepsilon^{\omega+\nu}$;

ς - частота відносних коливань спряжених поверхонь;

k_{o3} - коефіцієнт, що залежить від висоти виступів мікронерівностей профілю (Rpk_{ekv}+Rk_{ekv});

η - відносна площа контакту:

$$\eta = \alpha^{\frac{\omega}{(\nu+\omega)}} \cdot t_m^{\frac{\omega}{(\nu+\omega)}} \cdot q_r^{\frac{\nu}{(\nu+\omega)}} \cdot K_3^{\frac{(\nu+\omega)}{\nu}} \cdot B^{\frac{(\nu+\omega)}{\nu}} \tag{5}$$

де α - коефіцієнт пружності мікровиступів (можна умовно прийняти α=0,5 у випадку пружного контакту за умови забезпечення критерію Вільямсона-Грінвуда; або α=1,0 у випадку пластичного контакту за умови перевищення індексом пластичності величини 0,5H) [3, 9]; t_m – відносна опорна довжина по середній лінії профілограми мікронерівностей профілю; ν - параметр кривої Аббота; q_r - питомий контактний тиск; B, ω - емпіричні коефіцієнти, що залежать від властивостей матеріалу [9].

Перші два члени правої частини рівняння представляють хімічну складову фретинг-корозії. Ця величина зменшується з підвищенням частоти ς, оскільки при цьому скорочується час протікання хімічної реакції (чи адсорбції) за один цикл. Останній член рівняння представляє механічний чинник, не залежний від частоти, але пропорційний висоті виступів мікронерівностей профілю (Rpk_{ekv}+Rk_{ekv}) і навантаженню N. Причому фретинг-руйнування може бути обумовлене більшою мірою як першим, так і другим чинником.

Аналіз впливу технологічних чинників (мікрогеометричних та залишково-деформаційних) на інтенсивність прояву електроемісійних корозійних явищ слід проводити для певних наперед встановлених умов

експлуатації виробів. Розвиток корозійно-втомних пошкоджень функціональних поверхонь носить багатоосередковий характер і ініціюється виникненням на поверхні металу локальних вогнищ корозії на ділянках термодинамічної нестійкості. Вірогідність електроемісійного руйнування при циклічному вантаженні в корозійному середовищі конструкційних матеріалів визначається домінуванням одного з двох протилежних процесів: імовірністю виникнення і збільшення числа дефектів в процесі корозійної втоми електроемічійної природи і зменшення їх внаслідок релаксаційних процесів. Їх спільне вирішення, дозволило встановити залежність відношення циклічної довговічності на повітрі N_ε до довговічності в корозійному середовищі $N_{\varepsilon c}$ у деталях з попередньо деформованими в результаті їх механічного оброблення поверхнями:

$$\ln\left(\frac{N_\varepsilon}{N_{\varepsilon c}}\right) = t \cdot \left(\frac{k_\varepsilon^{A_\varepsilon} \cdot V_c \cdot e^{\frac{z \cdot F \cdot (\phi_0 \pm \Delta\phi_\varepsilon)}{R \cdot T}} \cdot \Delta\varepsilon_a \cdot \omega \cdot t_c}{\Delta m / S} - \varsigma \cdot e^{-\frac{U(\sigma)}{k \cdot T}} \right); \tag{6}$$

де $\Delta\varepsilon_a$ - дійсна амплітуда пластичної деформації; Δ_m/S – показник, що враховує утворення на поверхні металу площею S (м^2) оксидних плівок, що збільшують масу на Δ_m (кг); t_c - час дії корозії при циклічному вантаженні; $k_\varepsilon^{A_\varepsilon}$ - коефіцієнти концентрації деформації; A - показник ступеня в рівнянні кривої деформаційного зміцнення при статичному вантаженні (при пластичній деформації, відмінній від рівномірної спостерігається більше посилення електрохімічної гетерогенності матеріалу, анодні процеси локалізуються за місцем концентрації напружень [6]); V_c - швидкість корозії матеріалу за наявності пластичної деформації (кг/(м^2×с)); V_{c0} – константа, що визначає початкову швидкість корозії матеріалу [2]; z - валентність металу в іонізованому стані; F - число Фарадея; R – універсальна стагазова стала; T - абсолютна температура на поверхні виробу; φ_0 - стаціонарний електродний потенціал матеріалу в конкретному середовищі (В); $\Delta_{\varphi 0}$ - зміна електродного потенціалу під впливом пластичної деформації металу (В) [6]; V - швидкість релаксаційних процесів, що описується рівнянням Ареніуса [2]; ς - частотна характеристика матеріалу за рівнянням Ареніуса; U(σ) - енергія активації процесу релаксації, залежна від напруження [2]; k - стала Больцмана (k ~ 1,38·10−23 Дж/К).

Результати вивчення кінетики корозії металу в повітрі як в стійкому середовищі часто беруться за основу розробки і перевірки інженерних методів розрахунку корозійної стійкості матеріалів. Щодо корозійної стійкості оброблених поверхонь деталей, на основі аналізу реологічного моделювання технологічних переходів, можна зробити такі висновки:

1. В результаті збільшення швидкості різання (більше 150 м/хв) та зменшення подачі (менше 0,1 мм), питома величина деформаційної складової мікронерівності збільшується, що сприяє утворенню мікрорельєфу з значними значеннями глибини мікровпадин Rvk. Це спричинює зменшення концентрації оксидних продуктів на функціональній поверхні деталі, в результаті чого корозійна стійкість підвищується.

2. Підвищенню корозійної стійкості механічно-оброблених поверхонь деталей сприятиме ефект вибіркового переносу матеріалу спряжених поверхонь як результат самовільного утворення в зоні контакту пасивованої (без окислів) тонкої плівки з низьким опором зсуву, не здатної наклепуватись при терті, що може багаторазово деформуватись без руйнування. При цьому продукти зношування переходять з одної спряженої поверхню на іншу і утримуються в зоні трибоконтакту. Формування зони пластичної деформації визначається на основі функціонування модуля MicroCAE в складі CAF-системи [7].

3. З іншої сторони, неоднорідний характер пластичної деформації в зоні різання, призводить до різниці потенціалів між неоднаково-деформованими кристалами, тобто до утворення маси гальванічних пар, що є причиною зменшення корозійної стійкості оброблюваного матеріалу заготовки. Дослідження реологічної картини залишкових напружень II роду при механічному обробленні матеріалу присвячені дослідження описані в [8]. Формування зон неоднорідності фазових структур оброблюваного матеріалу заготовки визначається на основі функціонування модусу NanoCAE в складі CAF-системи.

Список використаних джерел: **1.** *Улиг Г.Г.* Коррозия и борьба с ней / Г.Г.Улиг, Р.У.Реви. Под ред. А. М. Сухотина. — Л.: Химия, 1989. - 456 с. **2.** *Семенова И.В.* Коррозия и защита от коррозии / И.В.Семенова, Г.М.Флорианович, А.В.Хорошилов. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. - 336 с. **3.** *Демкин Н.Б.* Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б.Демкин, Э.В.Рыжов.- М.: Машиностроение, 1981.- 224 с. **4.** *Ступницький В.В.* Проектування функціонально-орієнтованих технологій механічного оброблення деталей засобами паралельного інжинірингу / В.В.Ступницький // Вісник Донецького національного технічного університету «Прогресивні технології і системи машинобудування». - 2013.- Вип.1 (45). – 2 (46).- с. 249-256. **5.** *Суслов А.Г.* Инженерия поверхности деталей / А.Г.Суслов.- М.: Машиностроение, 2008. – 320 с. **6.** *Пачурин Г.В.* Теоретические основы повышения коррозионной долговечности упрочненных металлов и сплавов / Г.В.Пачурин // успехи современного естествознания.- М.: №2.- 2011.- с. 95-99. **7.** *Ступницький В.В.* Використання CAF-системи як основи формування функціонально-орієнтованих технологій машинобудівного виробництва / В.В.Ступницький // Вісник НУ "Львівська політехніка" "Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні і приладобудуванні".- 2012.- №746.- с. 40-45. **8.** *Ступницький В.В.* Визначення деформаційної складової параметру шорсткості із застосування методів реологічного імітаційного моделювання процесу різання / В.В.Ступницький // Машинознавство. — 2013. — №7-8 (193-194).- С.45-48. **9.** *Мышкин Н.К.* Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н.К.Мышкин, М.И.Петроковец.- М.: Физматлит, 2007. – 368 с.

Bibliography (transliterted): **1**. *Ulig G.G.* Korrozija i bor'ba s nej / G.G.Ulig, R.U.Revi. Pod red. A. M. Suhotina. — L.: Himija, 1989. 456 s. **2.** *Semenova I.V.* Korrozija i zashhita ot korrozii / *I.V.Semenova, G.M.Florianovich, A.V.Horoshilov.* — M.: FIZMATLIT, 2002. - 336 s. **3**. *Demkin N.B.* Kachestvo poverhnosti i kontakt detalej mashin / *N.B.Demkin, Je.V.Ryzhov. M*.: Mashinostroenie, 1981. 224 s. **4.** *Stupnic'kij V.V.* Proektuvannja funkcional'no-orientovanih tehnologij mehanichnogo

obroblennja detalej zasobami paralel'nogo inzhiniringu / *V.V.Stupnic'kij* // Visnik Donec'kogo nacional'nogo tehnichnogo universitetu «Progresivni tehnologiï i sistemi mashinobuduvannja». 2013. Vip.1 (45). – 2 (46). s. 249-256. **5**. Suslov A.G. Inzhenerija poverhnosti detalej / A.G.Suslov. M.: Mashinostroenie, 2008. – 320 s**. 6.** *Pachurin G.V.* Teoreticheskie osnovy povyshenija korrozionnoj dolgovechnosti uprochnennyh metallov i splavov / *G.V.Pachurin* // uspehi sovremennogo estestvoznanija.- M.: №2. 2011. c.95-99. **7**. *Stupnic'kij V.V. Vikoristannj*a CAF-sistemi jak osnovi formuvannja funkcional'no-orientovanih tehnologij mashinobudivnogo virobnictva / *V.V.Stupnic'kij // Visnik* NU "L'vivs'ka politehnika" "Optimizacija virobnichih procesiv i tehnichnij kontrol' v mashinobuduvanni i priladobuduvanni". 2012. №746. s. 40-45. **8**. *Stupnic'kij V.V.* Viznachennja deformacijnoï skladovoï parametru shorstkosti iz zastosuvannja metodiv reologichnogo imitacijnogo modeljuvannja procesu rizannja / *V.V.Stupnic'kij* // Mashinoznavstvo. — 2013. — №7-8 (193-194). S.45-48**. 9.** *Myshkin N.K.* Trenie, smazka, iznos. Fizicheskie osnovy i tehnicheskie prilozhenija tribologii / *N.K.Myshkin, M.I.Petrokovec. M.:* Fizmatlit, 2007. – 368 s.

УДК 629.7.03.035.5

Р.С. ТУРМАНИДЗЕ, д-р техн. наук, Тбилиси, Грузия

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЩНЫХ ВЕТРОВЫХ СТАНЦИЙ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РОТОРОВ С ИЗМЕНЯЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ В ДИНАМИКЕ И ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД АККУМУЛЯЦИИ ВЕТРОВОЙ И СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

У статті представлені результати дослідження робочої моделі роторів зі змінними параметрами геометрії в динаміці. На основі аеродинамічних і економічних розрахунків доведена ефективність використання таких конструкцій для потужних вітрових станцій. Дається аналіз різних конструкцій і методів відбору тої чи іншої конструкції для різних умов експлуатації вітрових установок в широкому діапазоні швидкості вітру.
Ключові слова: ротори зі змінними параметрами, вітрові станції

В статье представлены результаты исследования рабочей модели роторов с переменными параметрами геометрии в динамике. На основе аэродинамических и экономических расчетов доказана эффективность использования таких конструкций для мощных ветровых станций. Приведен анализ различных конструкций и методики выбора той или иной конструкции для различных условий эксплуатации ветровых установок в широком диапазоне изменения скорости ветра.
Ключевые слова: роторы с переменными параметрами, ветровые станции

In the report will be presented the investigation results of the working model of rotors with variable geometry parameters in dynamics. On the basis of aerodynamic and economic calculations the effectiveness of use of such designs for powerful wind stations is proved. The analysis of various designs and methods of selection of that or other design for various conditions of operation of wind installations in wide range of the wind speed change is given. Also rather effective by cost-price method of accumulation of wind energy will be suggested that is the topical world problem and for development of which are annually spent some hundreds of millions of US Dollars.
Keywords: rotors with variable geometry parameters, wind installations

В последние годы, в период существенного роста темпов глобального потепления и значительного ухудшения экологического состояния, получение энергии традиционными методами создает серьезную опасность для всего человечества. С этой точки зрения в особенно тяжелую ситуацию попадают развитые страны, где с каждым годом, интенсивно растет объем производства и, соответственно, количество потребляемой энергии.

В этом плане особенно надо отметить те факторы риска, которыми характеризуются атомные электростанции и то недовольство населения, который достиг своего пика в период катастрофы Фукушими, случившийся в Японии в 2011 г.

Всемирно известно, что эти процессы стали основой решений, которое вынуждает руководства всех стран осуществить оперативные мероприятия в

© Р.С. Турманидзе, 2016

направлении замены доли атомной энергии в общем энергетическом балансе страны каким-нибудь менее опасным видом энергии. Этими процессами обусловлено то, что в последние 10-15 лет почти во всех странах Мира особенное внимание уделяется совершенствованию существующих и созданию новых нетрадиционных методов получения энергии, а также максимальному использованию существующего в стране потенциала. Более того, руководящими органами международного сообщества разрабатываются специальные поощрительные мероприятия для тех стран и фирм, которые эффективно работают на развитие экологически чистых и неопасных методов получения энергии. К Таким видам энергии в первую очередь относятся ветровая и солнечная энергетика. Поэтому интенсивно совершенствуются конструкции ветровых станций и технология получения солнечных панелей. По обоим направлениям интенсивные работы ведутся в Грузинском техническом университете.

Для повышения эффективности ветровых станций были созданы несколько вариантов конструкций воздушных винтов с возможностью изменения основных геометрических параметров в динамике (ВИГ). Такими параметрами являются диаметр ротора, т.е. длина лопастей, угол установки каждой лопасти и закон их крутки.

Предварительные аэродинамические и экономические расчеты доказывают, что в результате использования таких конструкций можно увеличить годовой объем выработки каждой ветростанции минимум на 100%.

Несмотря на множество работ известных фирм, и ученых разных стран, проблема ВИГ еще не решена. Существуют патенты, не нашедшие реального воплощения, главным образом из-за сложности и недостаточной надежности технических решений.

Следует учесть, что все эти фирмы занимались изменением, какого-либо одного параметра, например, фирма «Сикорский» занималась изменением только диаметра винта, а корпорация «Боинг» - изменением только крутки лопастей.

Грузинский технический университет (ГТУ) предложил сочетание изменения диаметра и крутки одновременно в динамике.

Первоначально на этапе анализа, на основе расчленения объекта исследования был спроектирован и изготовлен макет винта с изменяемым диаметром, потом макет винта с изменяемой круткой лопастей. После лабораторных испытаний их основных узлов на этапе синтеза был создан винт с одновременно изменяемыми диаметром и круткой лопастей (рис. 1), а также стенд для его испытания [1].

Проведенные стендовые испытания модели ВИГ показали, что при высоких числах оборотов возникают значительные центробежные силы, действующие на ходовой винт. Ходовой винт – самый нагруженный элемент конструкции несущего винта и является слабым звеном. Снижение вредного воздействия этих сил и стало весьма актуальной проблемой.

Поэтому была разработана система компенсации центробежных сил. Технический подход состоял в проведении модельного эксперимента, в котором стенд стационарно закреплен на месте. При вращении винта в режиме вентилятора были осуществлены измерения тяги в зависимости от изменения частоты вращения и диаметра винта. Из возможных принципов компенсации (механического, электрического, гидравлического) был выбран гидравлический (рис 2), как наиболее гибкий в управлении [1-3].

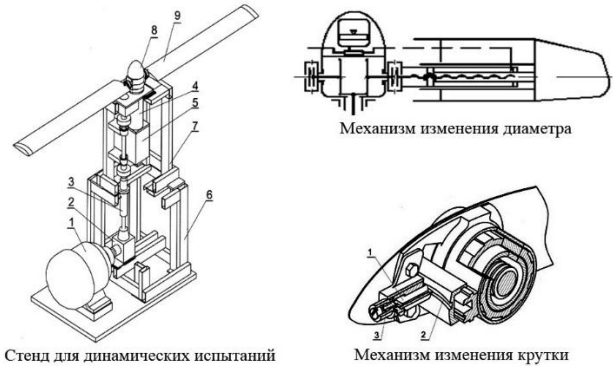


Рисунок 1 – Механизмы для управления параметров ВИГ-а и стенд для их испытания

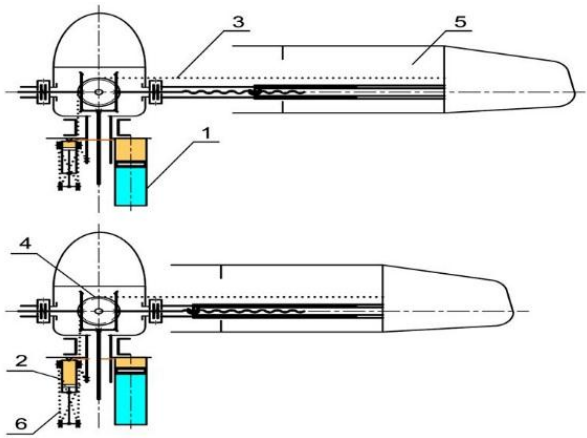


Рисунок 2 – Схема ВИГ с расположением гидропневматического аккумулятора и гидроцилиндра ниже втулки винта
1 - гидропневматический аккумулятор, 2 - гидроцилиндр, 3 - трос, 4 - ролик, 5 - лопасть, 6 - полиспаст

На конструкцию этого варианта ВИГ-а получен Европатент Application No/Patent No 08737551.5 - 2422 PCT/IB2008001041. В настоящее время патентуется в США. Все финансовые расходы патентования взял на себя Евросоюз.

Безопасность динамических испытаний ВИГ-а была обеспечена безотказностью узлов ВИГ с системой компенсации. Для оценки безотказности был сконструирован и изготовлен стенд статических испытаний (рис. 3), на котором были экспериментально имитированы нагрузки, действующие при различных частотах вращения винта.

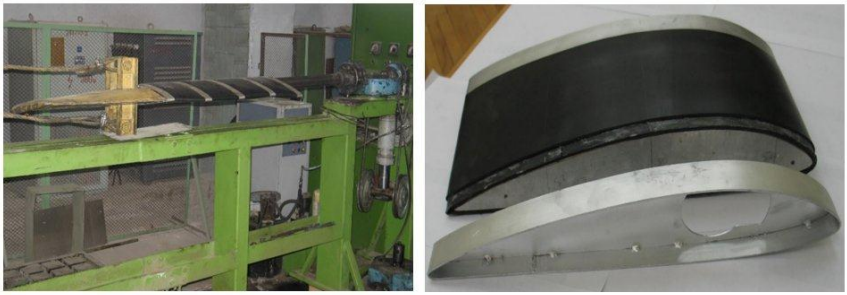


Рисунок 3 – Стенд для статических испытаний
и лопасть с гибкими элементами и нервюрами

Были определены линии упругости лопасти в зависимости от имитируемых частот вращения при сдвинутой и раздвинутой лопасти, а также зависимости усилий на рычаге управления стендом от имитируемых частот вращения.

Эксперименты, на стенде динамических испытаний (рис. 4), были проведены методом замера скорости воздушного потока крыльчатым анемометром, который для данной задачи характеризовался достаточной повторяемостью результатов измерений.

Установлено, что в случае увеличения диаметра винта в 1,4 раза и изменения крутки лопасти в пределах $16 \div 18^0$ обеспечивается повышение силы тяги примерно, в 1,6 раз.

Эффективность системы компенсации доказана многократным безотказным сдвижением-раздвижением лопасти винта во всем диапазоне изменения частот вращения. Это обусловило синхронность функционирования ВИГ-а.

Были накоплены результаты многократного и всестороннего исследования действующей модели воздушных винтов с изменяемыми геометрическими параметрами в динамике. На рис. 5 - 8 в качестве примера, показаны результаты исследования значений подъемной силы при

максимальных и минимальных диаметрах ротора в большом диапазоне изменения оборотов вращения.

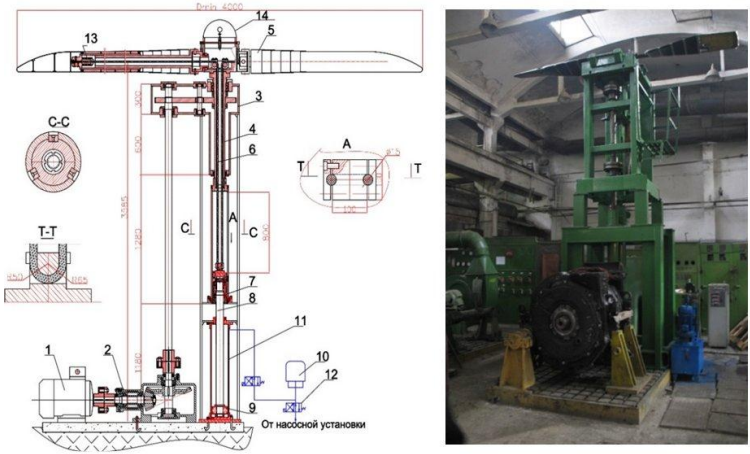


Рисунок 4 – Стенд динамических испытаний и фото стенда
1-Электродвигатель постоянного тока, 2-Конический редуктор, 3-Цилиндрический редуктор, 4-Шпиндель цилиндрического редуктора, 5-Лопасть с гибкими элементами, 6-Трос, 7-Узел подшипников с корпусом, 8-Шток, 9-Поршень, 10-Гидропневмоаккуму-лятор, 11-Гидроцилиндр, 12-Гидрораспределитель, 13-Узел крепления троса, 14-Втулка

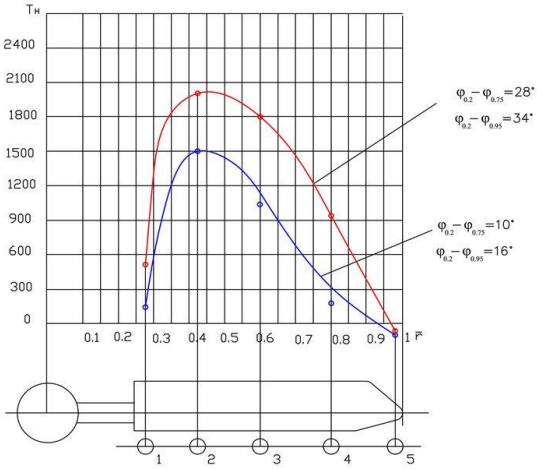


Рисунок 5 – График зависимости тяги ВИГ от изменения крутки лопастей для минимального диаметра $D_{\min}$ винта, частоты вращения $n = 300$ об/мин и угла установки $\varphi = 5^0$

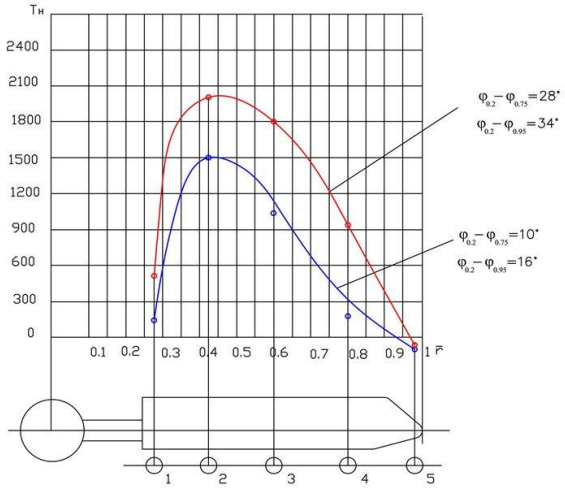


Рисунок 6 – График зависимости тяги ВИГ от изменения крутки лопастей для максимального диаметра $D_{\max}$ винта,

частоте вращения $n = 200$ об/мин и угла установки $\varphi = 5^0$

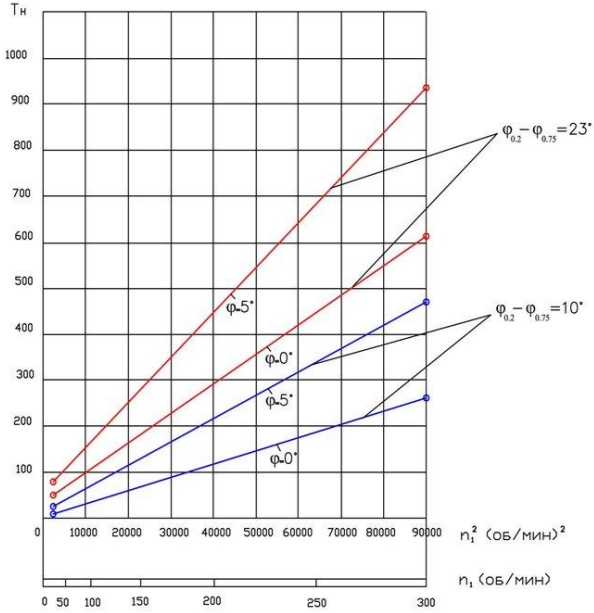


Рисунок 7 – График зависимости тяги ВИГ от частоты вращения

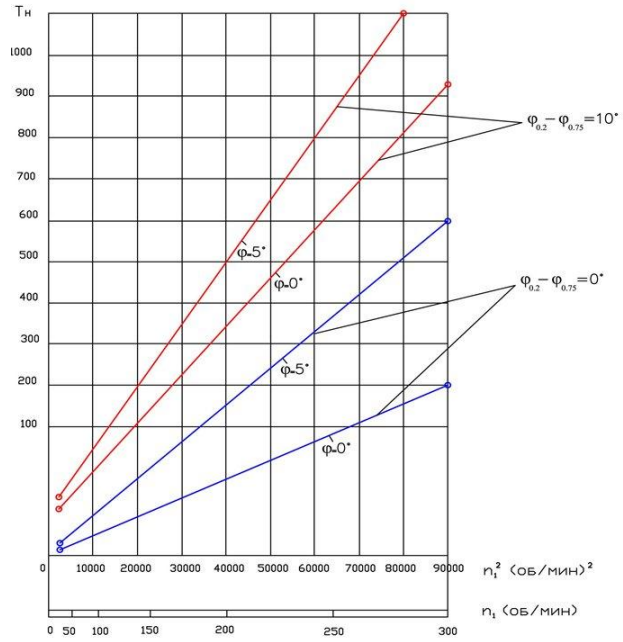


Рисунок 8 – График зависимости тяги ВИГ от частоты вращения винта, для максимального диаметра $D_{\max}$

В результате изготовления и испытания демонстрационной модели винта с изменяемыми геометрическими параметрами в динамике, нами было доказано, что для ветроэнергетических установок, особенно с большими мощностями, использование ВИГ-а даст возможность расширить диапазон максимальных значений КПД установки при изменении скорости ветра в большом диапазоне от 3 до 20÷22 м/сек, а также обеспечить работоспособность установки при тех высоких скоростях ветра (22÷35 м/сек) (Рис. 9), при которых существующие установки не в состоянии работать [4].

Проведен подробный анализ разных предлагаемых конструкций ротора и на этой основе предложены рекомендации подбора той или иной конструкции для разных условий эксплуатации ветроустановок в широком диапазоне изменения скорости ветра [5].

В настоящее время ведутся переговоры с известной Немецкой фирмой «Энеркон» для создания совместного предприятия или филиала на территории Грузии и производства наряду с стандартными роторами также новых конструкций.

Также ведутся переговоры с фирмой «Шмид» о производстве солнечных панелей.

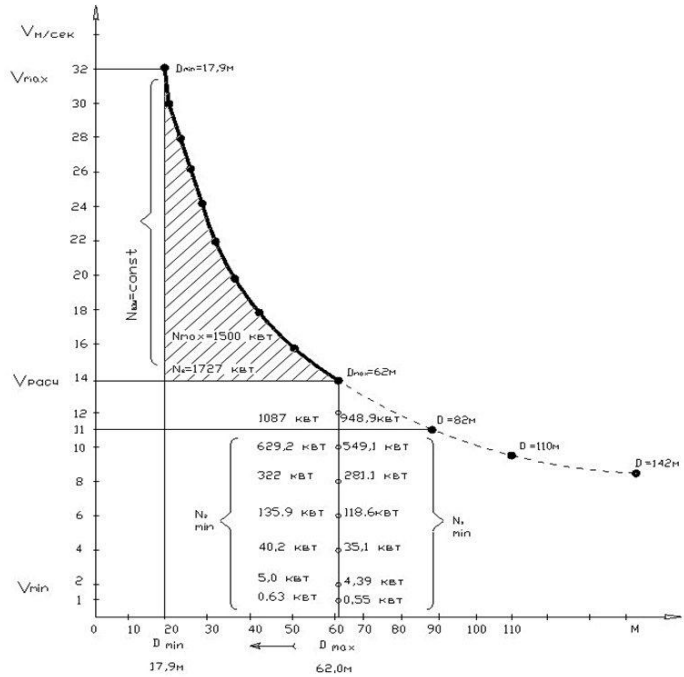


Рисунок 9 – Необходимое сочетание диаметра ротора и скорости ветра для получения запланированной мощности ветростанции

Осуществление данного проекта целесообразно, так как в Грузии функционировали несколько крупных предприятий по микроэлектронике, поэтому грузинские учёные имеют весьма интересные предложения по отдельным ответственным операциям производства пластин из монокристалла силиция, а также по принципам подбора мест для монтажа готовых солнечных модулей и создания конструкций соответствующих механизмов, внедрение которых ещё больше повысит эффективность солнечных модулей.

В частности, установка этих панелей, например над виноградниками по заранее рассчитанным параметрам, с использо¬ванием специальных механизмов, позволяющих менять угловое положение панелей в большом диапазоне, даст возможность наряду с получением электрической энергии, защитить плантации от града, а также от высыхания кисточек винограда и почвы, когда температура воздуха постоянно несколько недель держится в пределах $35 \div 40^0$ и выше. Следует отметить, что такая ситуация в Грузии очень частая и если это случается перед процессом уборки винограда, оно

сильно влияет на объем урожая, особенно на процент выхода виноградного сока.

Как защита плантаций от града, так и регулирование процесса высыхания винограда перед уборкой урожая является острой проблемой не только для Грузии, но и для всех других стран тоже, где имеются подобные плантации.

Поэтому мы интенсивно работаем над разработкой методов оптимизации схем монтажа солнечных панелей над виноградниками.

На рис. 10 показан один из вариантов схем монтажа таких панелей.

Рисунок 10 – Солнечные панели над виноградниками

В данный момент ведётся поиск оптимальных размеров панелей, схемы их расположения и совершенствование механизмов для регулирования их углового положения в широком диапазоне для разного периода времени. Разрабатываются также разные варианты механизации и автоматизации этих процессов.

На основе консультаций с опытными крестьянами установлено, что использование таких схем монтажа существенно повысит объем и качество урожая, что в конечном итоге даст ощутимый экономический эффект.

Представленная идея содержит и научную новизну, что совместно с немецкими специалистами уже оформляется и в ближайшем будущем будет оформлен Европатент.

В настоящее время достигнуто согласие наших партнеров для безвозмездной передачи примерно 200 м^2 солнечных панелей с целью

организации в Грузии опытного участка, где будут установлены опытные образцы солнечных панелей и проведены все необходимые исследования.

Существует ещё одна весьма актуальная проблема, над которой долгое время работают ведущие ученые многих известных научных центров всего мира, однако, к сожалению эффективного пути решения этой проблемы до сегодняшнего дня не существует. Вопрос касается метода аккумуляции полученной солнечной и ветровой энергий, для решения которого ежегодно тратятся несколько сотен миллионов долларов США.

Мы имеем на наш взгляд интересное предложение для решения этой проблемы в тех странах, где имеются гидроэлектростанции со средней и с большой мощностями, т.е. где уже имеются построенные высокие плотины и водохранилища.

Известно, что все такие электростанции имеют большой дефицит воды и тот объем, который, набирается в основном весной, потом постепенно, очень экономично расходуется целый год по специальному графику.

Суть нашего предложения заключается в том, что можно вокруг водохранилища монтировать максимально возможное количество ветровых станций и солнечных панелей. Когда будет заказ на электрическую энергию они будут работать на её выработку, а когда заказов нет, работать на перекачку воды обратно от нижнего водохранилища в верхнюю его часть. Это даст возможность, чтобы все источники энергии работали постоянно на прибыль, днем и ночью, ежедневно и круглый год.

На рис. 11 показана примерная схема компоновки таких сооружений, где видна монтированная одна маленькая группа ветряков и солнечных модулей. Также видна, что вокруг водохранилища можно разместить еще таких несколько групп.

Рисунок 11 – Примерный вариант компоновки агрегатов
и системы их управления
для аккумуляции полученной ветровой и солнечной энергий

Консультации с ведущими специалистами энергетики показывают, что после создания такого опытного объекта и совершенствования его отдельных узлов и системы их управления объект будет широко, успешно и эффективно использоваться во многих странах мира.

Список использованных источников: **1**. *R.Turmanidze, L.Dadone.* „Variable Geometry Rotor“. Monograph, Publishing House of University of Petrosani. 2003, Romania, 164 p. **2.** *R.Turmanidze, L.Dadone, G.Sanadze.* Increase of Flight and Technical Characteristics of Flying Vehicles By Means of Application of the Variable Geometry Rotor. Materials of the 5th Forum of the Russian Helicopter Society. Moscow, 2002. p. VI39-VI48. **3.** *R.Turmanidze, L.Dadone, J.-J.Philippe, B.Demaret,* Investigation, Development and Tests Results of the Variable Geometry Rotor. 33 rd European Rotorcraft Forum. Kazan, 10–14 September 2007, Pages 11. **4.** *R.Turmanidze, O.Rukhadze, R.Bidzinashvili, E.Rukhadze,* Designing Fundamentals of Investigation Equipment of Rotors with the Parameters of Variable Geometry. International Scientific Journal «Problems of Mechanics». №1 (42)/2011. Georgia, Tbilisi. 2011. 8 p. **5.** *R.Turmanidze, O.Rukhadze, R.Bidzinashvili, E.Rukhadze,* Investigation of the Variable Geometry Rotor in Dynamics. International Scientific Journal «Problems of Mechanics». №2 (43)/2011. Georgia, Tbilisi. 2011. 8 p.

Bibliography (transliterted): 1. R.*Turmanidze, L.Dadone.* „Variable Geometry Rotor“. Monograph, Publishing House of University of Petrosani. 2003, Romania, 164 p. **2.** *R.Turmanidze, L.Dadone, G.Sanadze*. Increase of Flight and Technical Characteristics of Flying Vehicles By Means of Application of the Variable Geometry Rotor. Materials of the 5th Forum of the Russian Helicopter Society. Moscow, 2002. p. VI39-VI48. **3.** *R.Turmanidze, L.Dadone, J.-J.Philippe, B.Demaret,* Investigation, Development and Tests Results of the Variable Geometry Rotor. 33 rd European Rotorcraft Forum. Kazan, 10–14 September 2007, Pages 11. **4.** *R.Turmanidze, O.Rukhadze, R.Bidzinashvili, E.Rukhadze,* Designing Fundamentals of Investigation Equipment of Rotors with the Parameters of Variable Geometry. International Scientific Journal «Problems of Mechanics». №1 (42)/2011. Georgia, Tbilisi. 2011. 8 p. **5.** R.*Turmanidze, O.Rukhadze, R.Bidzinashvili, E.Rukhadze,* Investigation of the Variable Geometry Rotor in Dynamics. International Scientific Journal «Problems of Mechanics». №2 (43)/2011. Georgia, Tbilisi. 2011. 8 p.

УДК 621.923

В.А. ФЕДОРОВИЧ, д-р техн. наук, Харьков,
В.А. ЗАЛОГА, д-р техн. наук, Сумы,
И.Н. ПЫЖОВ, д-р техн. наук, Харьков,
Д.В. КРИВОРУЧКО, д-р техн. наук, Сумы,
Д.В. ФЕДОРЕНКО, Харьков, Украина

МЕТОДОЛОГИЯ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Розроблено єдину комплексну методологію тривимірного моделювання фізичних процесів виготовлення алмазно-композиційних матеріалів і процесів алмазно-абразивної та лезової обробки інструментами з них. Створення системи 3D-CAD моделювання процесів виготовлення абразивно-алмазних інструментів і процесів обробки дозволяє істотно підвищити вірогідність отриманих результатів, скоротити обсяг експериментальних досліджень для визначення оптимальних умов шліфування і розробити нові технології, інструменти та устаткування.
Ключові слова: процес шліфування, алмазно-композиційний матеріал, алмазоносний шар, 3D моделювання, напружено-деформований стан, умови обробки, характеристика круга, еквівалентні напруги, ультразвукові коливання, правка круга

Разработана единая комплексная методология 3D моделирование физических процессов изготовления алмазно-композиционных материалов и процессов алмазно-абразивной и лезвийной обработки инструментами из них. Создание системы 3D-CAD моделирование процессов изготовления абразивно-алмазных инструментов и процессов обработки позволяет существенно повысить достоверность полученных результатов, сократить объем экспериментальных исследований для определения оптимальных условий шлифования и разработать новые технологии, инструменты и оборудование.
Ключевые слова: процесс шлифования, алмазно-композиционный материал, алмазоносный слой, 3D моделирование, напряженно-деформированное состояние, условия обработки, характеристика круга, эквивалентные напряжения, ультразвуковые колебания, правка круга

The three-dimensional (3D-CAD) methodology of integrated study of interdependent processes of design, manufacture and operation of diamond-abrasive tools and reliability growth of single-point tool at stage of their sharpening is developed. Creation of system of 3D simulation of diamond-abrasive tools and machining processes allows to increase essentially probability of obtained results and to reduce scope of experimental research for defining the best grinding conditions and to develop new technologies, tool and equipment.
Keywords: grinding process, diamond composite material, diamond layer, 3D modeling, stress-strain state, the processing conditions, terms of characterization, equivalent stresses, ultrasonic vibration, correction range

1. Постановка проблемы. К труднообрабатываемым материалам в первую очередь относятся алмазно-композиционные материалы (АКМ). Широкое использование АКМ как особого класса обрабатываемых материалов (ОМ) в различного рода изделиях потребовало разработки современных технологий их высокопроизводительной и прецизионной

© В.А. Федорович, В.А. Залога, И.Н. Пыжов, Д.В. Криворучко, Д.В. Федоренко, 2016

обработки. В настоящее время отсутствует единая комплексная методология трёхмерного (3D-CAD) моделирования физических процессов алмазно-абразивной и лезвийной обработок, однако имеется реальная перспектива её разработки. Создание такой методологии позволит существенно сократить объём экспериментальных исследований для определения рациональных конструктивных параметров алмазно-абразивных и лезвийных инструментов, оптимальных условий их изготовления и использования.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Современные тенденции создания наукоемкой продукции характеризуются резким расширением приложений математики, во многом связанным с созданием и развитием средств вычислительной техники [1]. Развитие вычислительной техники открывает перспективы разработки 3D методологии комплексного исследования взаимосвязанных процессов изготовления и эксплуатации АКМ и режущих инструментов из них, повышения их надежности. В мировой практике наблюдается тенденция перехода от двухмерного к трехмерному компьютерному моделированию, диктуемая необходимостью повышения адекватности и информационной достаточности моделей. Предпосылкой такого перехода является развитие метода конечных элементов, аппаратных возможностей вычислительной техники и программного обеспечения. Создание методологии 3D компьютерного моделирования позволит существенно сократить объем экспериментальных исследований для определения рациональных структурных параметров АКМ, оптимальных условий их изготовления и использования.

Создание методологических основ и системы 3D-CAD моделирования АКМ на этапах их изготовления и эксплуатации позволит существенно повысить эффективность их обработки и применения [2]. Анализ литературных источников в исследуемой области показал, что данные по 3D моделированию процессов шлифования и изготовления алмазно-абразивных инструментов практически отсутствуют.

3. Цель исследования. Разработка теоретических основ и средств реализации методологии компьютерного 3D моделирования физических процессов для разработки оптимальных ресурсосберегающих технологий абразивной и лезвийной обработки инструментами из алмазных композиционных материалов (АКМ).

4. Материалы исследований. Предлагаемая 3D методология исследования процессов изготовления и эксплуатации АКМ охватывает все основные этапы жизненного цикла изделия. В качестве АКМ будем рассматривать все алмазосодержащие композиции в широком смысле, включая алмазно-абразивные инструменты на различных связках и другие алмазосодержащие инструментальные материалы. Методология 3D моделирования включает следующие этапы: 1 – трехмерное компьютерное моделирование процесса спекания АКМ для определения условий, при

которых сохраняется целостность алмазных зерен; 2 – трехмерное компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) зоны шлифования с целью определения рациональных условий обработки; 3 – трехмерное компьютерное моделирование процесса правки абразивных кругов алмазным инструментом; 4 – трехмерное исследования параметров топографии рабочей поверхности круга (РПК) и обработанной поверхности методом лазерного сканирования; 5 – трехмерное моделирование процесса заточки лезвийного инструмента с целью определения условий его безотказной работы; 6 – трехмерное компьютерное моделирование НДС зоны лезвийной обработки с целью определения рациональных режимов резания и геометрии инструмента из АКМ; 7 – разработка экспертной системы определения рациональных характеристик АКМ и режимов обработки этих материалов, их использования в режущем инструменте. Таким образом, реализуется идеология полной компьютерной автоматизации моделирования всех процессов, включая изготовление, обработку и эксплуатацию АКМ. Некоторые из этих этапов изложены в сборнике, посвященном юбилею профессора Семко М. Ф. [2].

Реализация предложенной последовательности экспериментальным путем является чрезвычайно трудоемким и дорогостоящим процессом.

Использование компьютерных информационных технологий на всех этапах жизненного цикла АКМ рассматривается как приближение к идеологии CALS-технологии (Computer-Aided Logistics Support) [3-4]. Они обеспечивают компьютерное управление жизненным циклом изделия на всех этапах: разработки концепции изделия; проведения научно-исследовательских работ; проектирования, производства; эксплуатации изделия; модернизации изделия; обеспечения ремонта и технического обслуживания изделия; утилизации.

Для реализации поставленных задач изучения НДС в зоне обработки и в процессе изготовления инструмента были использованы расчетные комплексы ANSYS, LS-DYNA, Third Wave AdvantEdge, CosmosWorks, Abaqus предназначенные для исследовательских расчетов методом конечных элементов. Для построения 3D-моделей, имитирующих упомянутые процессы, применялась система автоматизации проектных работ (САПР) в трёх измерениях (SolidWorks).

В плане моделирования процессов спекания АКМ и исследования зоны обработки эти пакеты (в универсальной комплектации) позволяют решать следующие классы задач: определение перемещений, деформаций и напряжений (НДС) в системе «алмазные зерна – связка - ОМ» при

статических воздействиях (линейная статика); определение НДС системы с использованием нелинейных моделей (физическая, геометрическая нелинейность); НДС при контакте деформируемых твердых тел; НДС в элементах системы при наличии трещин; анализ частот и форм собственных колебаний конструкции; динамический гармонический анализ и случайный отклик – оценка поведения системы при внешнем полигармоническом или случайном воздействии; динамические переходные процессы – расчет поведения системы во времени при действии на нее нестационарной внешней нагрузки; анализ усталостного разрушения элементов системы; анализ стационарной и нестационарной гидродинамики; стационарные и нестационарные нелинейные тепловые процессы – определение распространения тепловых потоков, анализ температурных полей и деформаций; определение чувствительности результатов всех видов анализа к изменению свойств элементов системы; многокритериальная оптимизация с использованием одновременно ограничений разного типа с возможностью управления пользователем ходом процесса; адаптивный анализ напряжений.

Общая концепция проведения статических модельных экспериментов представлена на рис. 1.

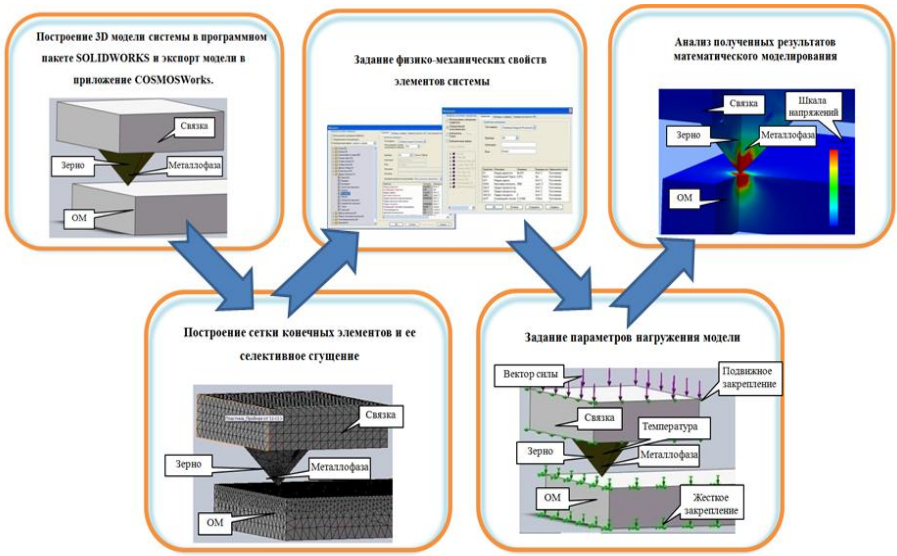


Рисунок 1 – Последовательность статического 3*D* моделирования процесса шлифования

Общая концепция проведения динамических модельных экспериментов представлена на рис 2.

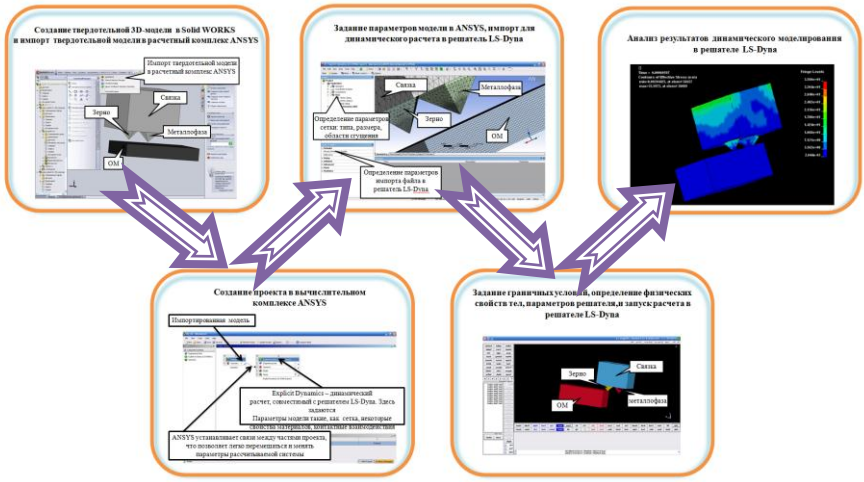


Рисунок 2 – Последовательность динамического 3D моделирования процесса шлифования

Моделирование процесса спекания АКМ [2]. Эффективность работы инструментов из АКМ обусловлена рядом причин, в число которых входит дефектность структуры, связанная с разрушением части зерен в процессе изготовления инструмента. В институте сверхтвердых материалов НАН Украины, под руководством академика Новикова Н. В. доказали, что при спекании композиционных алмазосодержащих материалов типа «твесал» до 90% алмазных зерен разрушаются [5]. Подобие процессов спекания композиционных алмазосодержащих материалов типа «твесал» и алмазоносного слоя шлифовальных кругов на металлических и керамических связках, а также измерение размеров зерен алмазного порошка, извлеченных из фрагмента алмазоносного слоя не работавшего круга, свидетельствуют о дроблении алмазных зерен в процессе его изготовления. Факторами, в значительной степени влияющими на целостность зерен, являются состав связки, марка алмазного зерна, его зернистость и концентрация в спеке, а также технологические особенности изготовления АКМ.

Задачей процесса 3D моделирования НДС зоны спекания АКМ является определение оптимального сочетания прочностных свойств связки и алмазных зерен, а также зернистости и концентрации последних, при которых обеспечивается сохранение целостности алмазных зерен в процессе спекания

АКМ.

Применительно к процессу спекания фрагмент алмазоносного слоя круга моделировался кубом связки с размерами 300х300х300 мкм с помещенными в него алмазными зернами в форме эллипсоида вращения размерами 120х100 мкм, что соответствует 100% концентрации алмазного круга. Металлофаза в алмазном зерне моделировалась в виде прослойки толщиной 5-10 мкм различной формы и длины. Схема и конечно-элементная (КЭ) модель процесса спекания АКМ представлена на рис. 1.

Расчеты по методу конечных элементов в пакете прикладных программ «Cosmos» и «Ansys» позволили в компьютерном режиме количественно оценить главные и приведенные напряжения, энергию деформации и плотность энергии деформации в спекаемых элементах в зависимости от их размеров, физико-механических свойств и условий спекания (температура, давление). Объемы материалов считались разрушенными, если приведенные напряжения и/или плотность энергии деформации в них превышали соответствующие предельные значения.

Пример разработанной 3D модели системы «связка – покрытие - алмазное зерно - металлофаза» с граничными условиями, температурным и силовым нагружением, а также КЭ модель представлена на рис. 3.

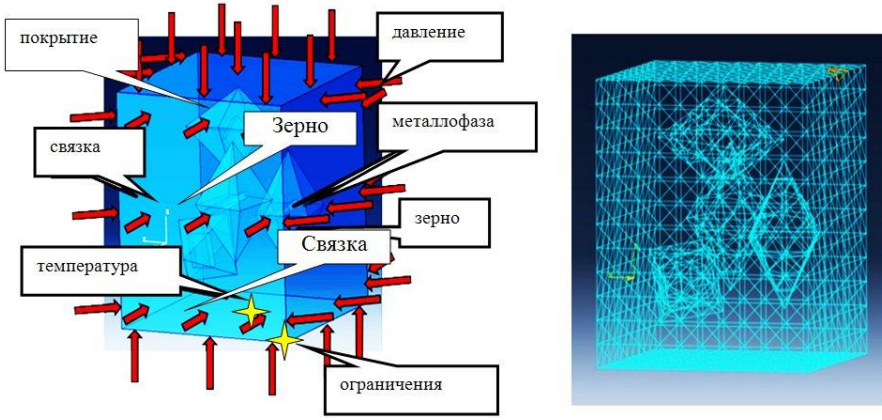


Рисунок 3. – Схематическая (а) и КЭ (б) модели системы «связка – покрытие - алмазное зерно - металлофаза»

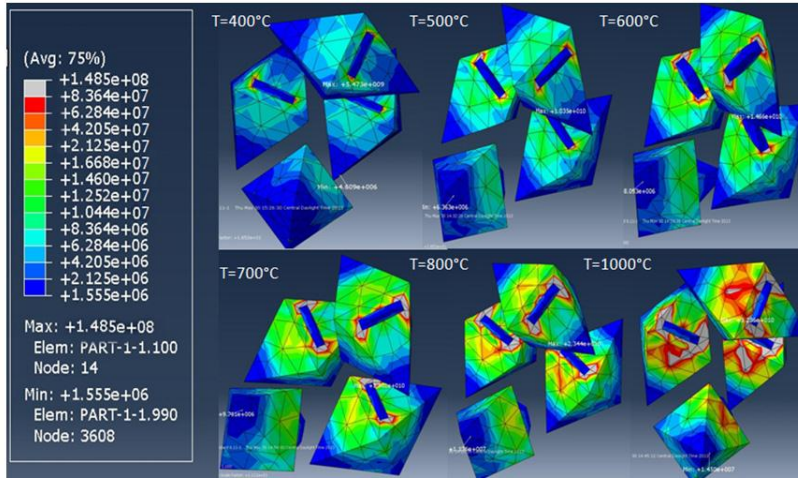
Моделировался процесс спекания АКМ различной концентрации на различных металлических, керамических и органических связках с различными по прочности алмазными зернами от АС2 до АС160Т. Модель нагружалась давлением и температурой, соответствующей реальному процессу спекания АКМ.

На первом этапе расчеты поводились для фрагмента алмазоносного слоя, включающего единичное алмазное зерно, окруженное массивом металлической связки. При этом варьировались размер зерна, соответствующий зернистостям от 50/40 до 500/400, температура и давление спекания, а также физико-механические свойства исследуемых компонентов спека. На втором этапе рассматривался фрагмент алмазоносного слоя, включающий несколько алмазных зерен, объединенных связкой (рис. 3, а). В этой серии варьировалось соотношение размеров алмазных зерен и размеров массива связки, окружающего эти зерна, что соответствовало различным значениям зернистости и концентрации (от 5 до 200%) алмазов в спекаемом слое. В модели зерна и связка рассматривались упругими сплошными телами. Алмазные зерна моделировались в виде эллипсоидов вращения с размерами от 50х30 до 500х300 мкм в зависимости от рассматриваемой зернистости. Наличие металлической фазы в алмазных зернах моделировалось произвольно ориентированными прослойками, объемное содержание которых составляло 0,1–10% в зависимости от марки зерна. Связка представлялась в виде призматического фрагмента с размерами от 0,5х0,5х1,1 до 3х3х6 в зависимости от марки, размера и концентрации зерен. Модель нагружалась статической одноосной равномерно распределенной нагрузкой в виде прикладываемых давления с учетом температуры.

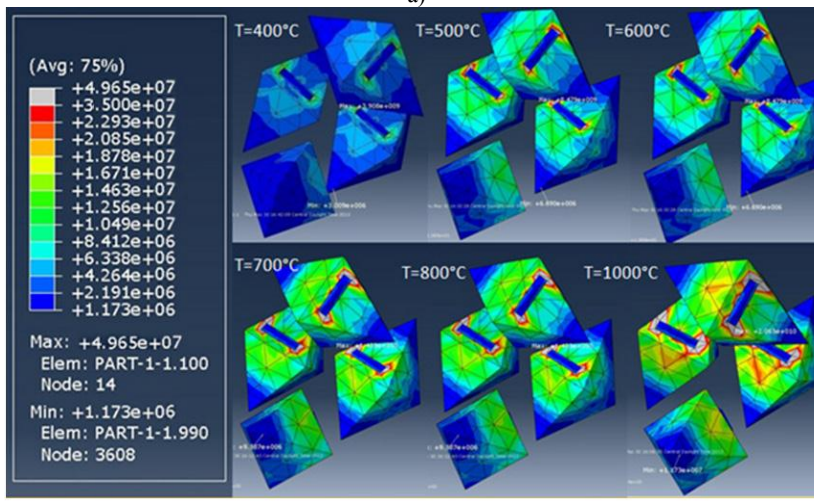
Были проведены теоретические исследования процесса спекания АКМ на различных связках с целью определения условий, при которых обеспечивается целостность алмазных зерен в материале. Установлено, что напряжения, превышающие пределы прочности алмазных зерен и располагающиеся вдоль прослоек металлофазы, обуславливают появление внутренних трещин в зерне. Напряжения на периферии спекаемого зерна распределены таким образом, что могут приводить к скалыванию субмикрокромок на зернах и тем самым скруглять режущие кромки. Это впоследствии может отрицательно сказаться на режущей способности зерен в алмазном круге [2]. Результаты 3D моделирования в виде эпюр распределения напряжений при спекании кругов, возникающих при одновременном термосиловом нагружении для случаев металлофазы разного состава представлены на рис. 4.

Влияние пористости связки. Часть объёма круга, не занятая абразивом и связкой, представлена порами, заполненными воздухом (или пропиткой в случае импрегнированных кругов). Роль пор, их размеров и плотности распределения настолько велика, что они считаются третьей по значимости (после абразивных зерен и связки) составляющей структуры алмазного круга.

Высокая пористость круга способствует лучшему подводу охлаждающей жидкости в зону шлифования и отводу отработанного шлама, что уменьшает «засаливание» кругов.



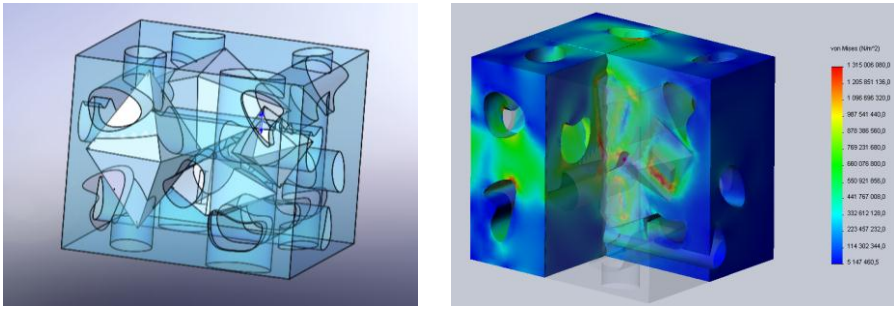
а)



б)

Рисунок 4 – Эпюра распределения НДС
в системе «алмазное зерно – металлофаза - связка» при термосиловом нагружении:
а) металлофаза на основе меди; б) металлофаза на основе железа

Информация в литературе о влиянии пористости круга на целостность алмазных зерен при спекании нами не найдена. Пористость абразивного инструмента может изменяться в широких пределах: от 29 об. % (для обдирочных и отрезных кругов) до 65 об. % (для кругов, предназначенных для шлифования труднообрабатываемых металлов и сплавов). Однако, следует отметить, что высокопористые круги изготавливают на основе абразивно-керамических композиций с использованием в качестве абразива электрокорунда, карбида кремния или эльбора. Учитывая вышеизложенное, с использованием моделей, отражающих количественный показатель пористости (об. % пор) было проанализировано влияние пористости связки на НДС исследуемой системы. Пример такой модели представлен на рис. 5, а и результаты расчета НДС в пористом круге на рис. 5, б.



а) б)

Рисунок 5 – Модель системы «металлофаза – зерно – связка - поры» (а) и распределение напряжений при спекании композита, содержащего алмазные зерна АС4 125/100 и керамическую связку К1 при концентрации пор 30 об. % (б)

Варьированием сочетания различной прочности алмазных зерен и их концентрации в круге для различных связок определялось такое из них, при котором обеспечивалось сохранение целостности алмазов. Установлено, что, например, далеко не все серийно выпускаемые алмазные круги с используемым сочетанием марок алмазных зерен с металлическими и керамическими связками могут быть изготовлены со стандартной концентрацией алмазных зерен без нарушения их целостности. Например, при спекании круга на связке М6-14 с алмазными зернами марки АС6 концентрация их в круге не должна превышать 7%, в противном случае они будут разрушаться уже в процессе изготовления круга. Показано, что для гарантийного сохранения целостности алмазных зерен практически во всех серийно выпускаемых кругах их концентрация должна быть существенно меньше применяемой. Такая тенденция хорошо увязывается с возможностью

и необходимостью снижения концентрации алмазных зерен в круге до уровня 10-15% при шлифовании сверхтвердых материалов [6], [7].

Проведенными расчетами установлены оптимальные сочетания свойств связки и алмазных зерен с предельно допустимой концентрацией их в АКМ, обеспечивающие сохранение их целостности в процессе изготовления. Полученные на первом этапе оптимальные соотношения прочностей связки, алмазных зерен и их концентрация в алмазно-абразивном инструменте являются лишь ограничивающими параметрами и должны быть уточнены для процесса алмазного шлифования в зависимости от прочностных свойств обрабатываемого материала.

Исследование процесса микрорезания единичным алмазным зерном. Использование специализированного программного пакета «Third Wave Advant Edge», базирующегося на методе конечных элементов, позволяют проводить модельные эксперименты по исследованию процесса микрорезания единичными алмазными зернами, различной геометрии и в различных условиях нагружения системы, различных материалов. Компьютерное 3D моделирование процесса микрорезания различными алмазными зернами позволяет в динамике проследить изменение полей напряжений, температур и деформаций при обработке различных материалов (рис. 6).

Результаты модельных экспериментов процесса микрорезания единичным алмазным зерном позволяют определять рациональные сочетания прочностных свойств алмазных зерен и обрабатываемого материала и рациональные режимы шлифования (скорость, подача, глубина).

Моделирование процесса алмазно-абразивной обработки АКМ. Поскольку эффективность любого процесса алмазно-абразивной обработки определяется уровнем НДС зоны шлифования, НДС моделировалось в зоне обработки в различных условиях. Количественная оценка уровня напряжений, энергии деформации или плотности энергии деформации, возникающих в ОМ, алмазных зернах и связке круга при различных условиях шлифования открывает новые возможности для определения условий повышения эффектности процесса обработки.

Исследование НДС зоны шлифования проведены применительно к процессу алмазного шлифования АКМ. Основной задачей исследования НДС зоны шлифования являлось определение условий, обеспечивающих рациональное распределение энергии, подводимой в зону обработки, между элементами системы. Методика 3D моделирования НДС системы «АКМ – зерно - связка» позволяет определять энергию и плотность энергии деформации в каждом элементе системы при различных условиях

нагружения и определять условия, при которых максимальная часть подводимой энергии в зону шлифования будет направлена на микроразрушение АКМ, минимизируя разрушение алмазных зерен и исключая их выпадение из связки.

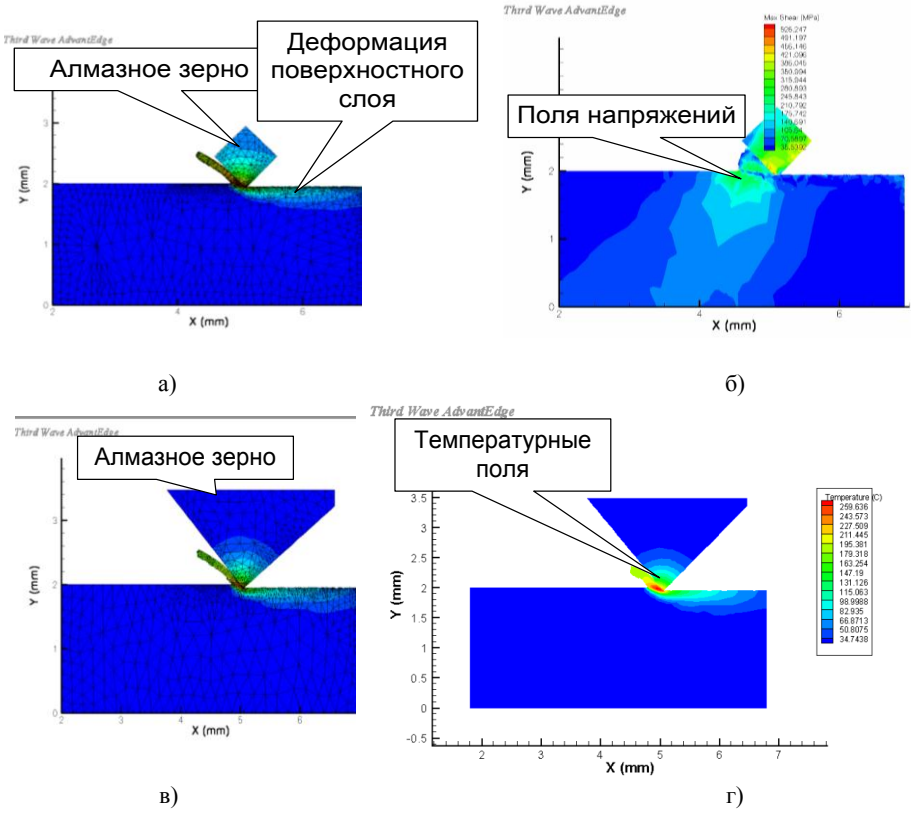
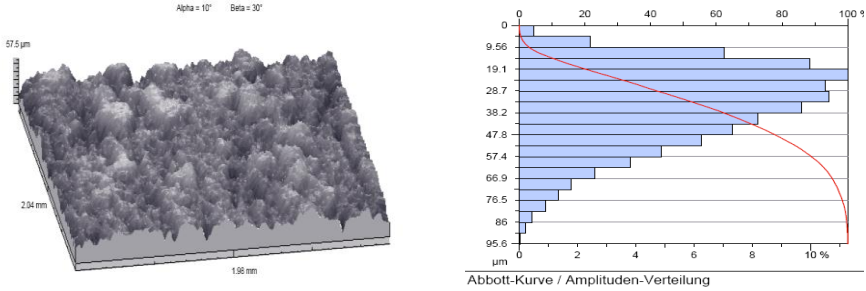


Рисунок 6 – Моделирование процесса микрорезания единичным алмазным зерном
а) – КЭ модель микрорезания зерном с площадкой износа;
б) – результаты расчета полей напряжений;
в) – КЭ модель микрорезания острым алмазным зерном;
г) – результаты расчета температурных полей

Использование современных пакетов прикладных программ для метода конечных элементов типа «Cosmos» при 3D моделировании НДС единой системы «ОМ – зерно - связка» позволило в максимально приближенных к реальным условиях оценивать влияние физико-механических свойств алмазных зерен, ОМ и связки на уровень главных и приведенных силовых,

температурных, и термосиловых напряжений, энергии и плотности энергии деформации. Методика позволяет оценивать 3D НДС всех элементов системы одновременно, что важно при определении области оптимальных сочетаний их физико-механических свойств и режимов взаимодействия.

Для определения фактической площади контакта в системе «РПК - ОМ» реализована методика лазерного сканирования и компьютерной обработки топографии рабочей поверхности круга (РПК) и обработанной поверхности, позволяющая исследовать изменения 3D параметров РПК и ОМ, субмикрорельефа отдельных алмазных зерен, в компьютерном режиме оценивать относительную опорную площадь топографии поверхности t_{ps}. [8]. При этом можно определять величину t_{ps} как на макроуровне (РПК поверхности круга), так и на микроуровне – микрорельеф отдельных алмазных зерен. Величина субмикрорельефа отдельных алмазных зерен является важным параметром при определении фактической площади контакта в системе «АКМ - зерно», который трудно получить другими способами. А поскольку именно субмикрорельеф алмазных зерен определяет эффективность микроразрушения ОМ, исследование этого параметра представляется чрезвычайно важным. Примеры 3D топографии рабочей поверхности круга (РПК) и ее параметров приведены на рис. 7.



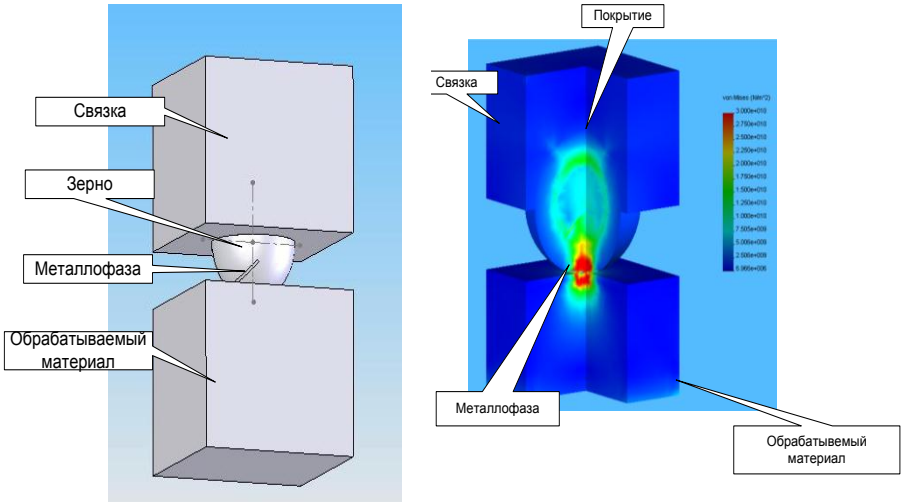
а) б)

Рисунок 7 – 3D топография поверхности РПК (а)
и плотность распределения относительной опорной площади РПК (б)

Для повышения эффективности процессов алмазного шлифования вопросы оптимального сочетания физико-механических свойств алмазных зерен их зернистости и концентрации должны решаться для каждой конкретной металлической или керамической связки в зависимости от физико-механических свойств ОМ. Оптимальное сочетание прочностей связки, зерен и их концентрация должно обеспечивать такой уровень НДС в зоне шлифования, при которых: обеспечивается удержание алмазных зерен в

связке; исключается хрупкое микроразрушение алмазных зерен (при шлифовании «мягких» материалов) или их самозатачивания без образования площадок износа (при шлифования «твердых» материалов); обеспечиваются максимальные напряжения в ОМ (съем припуска); исключается образование недопустимого дефектного слоя (брак).

Расчетная схема и пример результатов расчета НДС системы «АКМ – зерно - связка» приведен на рис. 8.



а) б)

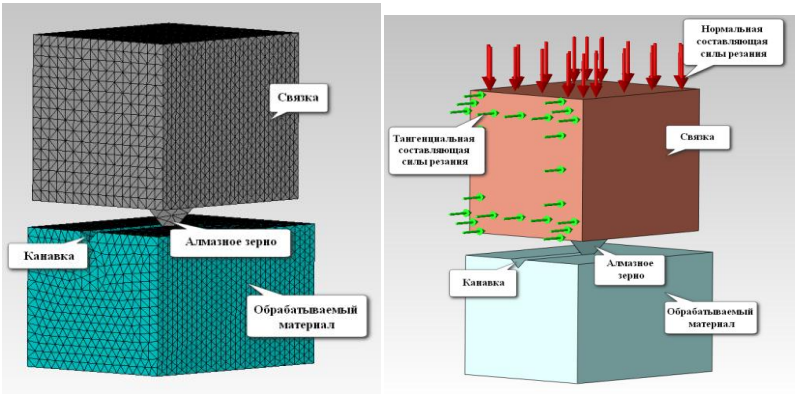
Рисунок 8 – Расчетная схема 3D модели зоны шлифования (а)
и пример результатов расчета 3D НДС системы «АКМ – зерно - связка»

Методика 3D моделирования позволяет теоретически определять область оптимального разрушения элементов системы «АКМ – зерно - связка», в которой зерно удерживается в связке и не разрушается, а АКМ разрушается в контакте, но не растрескивается при воздействии общей нагрузки всех зерен, т.е. исключается брак. Теоретически может быть определена область оптимальных условий алмазного шлифования различных марок АКМ, в том числе и вновь создаваемых. Дальнейшие экспериментальные исследования с целью сокращения их объема, будут проводиться в этой области. Такое соотношение прочностных свойств ОМ, связки и алмазных зерен обеспечивает бездефектную обработку при условии максимально возможной производительности и минимального удельного

расхода зерен в процессе алмазного шлифования. Определение подобных оптимальных соотношений применительно к процессу алмазного шлифования не только АКМ, но и твердых сплавов, керамики, полимеров и других ОМ является одним из важных резервов повышения эффективности конкретного вида обработки. Установлено, что прочность связки круга является важнейшим параметром, определяющим не только степень алмазоудержания, но и производительность процесса шлифования АКМ. Концентрация алмазных зерен в круге должна назначаться, исходя из соотношения прочностей элементов системы «ОМ – зерно - связка». Уровень дефектности при алмазном шлифования АКМ определяется соотношением прочностей АКМ, связки, алмазных зерен и их концентрацией в круге.

Трехмерное моделирование процесса ультразвукового (вибрационного) алмазного шлифования. Перспективным направлением повышения производительности и улучшения качества поверхности при алмазно-абразивной обработке является введение в зону резания ультразвуковых колебаний (УЗК) малой амплитуды. Установлено, что ультразвуковые колебания оказывают положительное влияние на силы при микрорезании отдельными зернами и в целом на съем обрабатываемого материала (ОМ) и тем самым способствуют повышению эффективности абразивной обработки [8, 9].

При изучении процесса вибрационного шлифования, прежде всего, необходимо определить влияние УЗК, прикладываемых к РПК во время шлифования, на НДС системы «связка – зерно - ОМ». Используемый нами программный пакет *CosmosWorks* позволяет проводить трехмерное статическое моделирование. Прежде всего, была построена исходная 3D-модель «связка - алмазное зерно - ОМ» (рис. 9, а).



а) б)

Рисунок 9 – Исходная 3D-модель системы «связка – зерно - ОМ» с сеткой конечных элементов и задание параметров нагружения

Затем были заданы физико-механические свойства всех элементов системы, представленные на рис. 10.

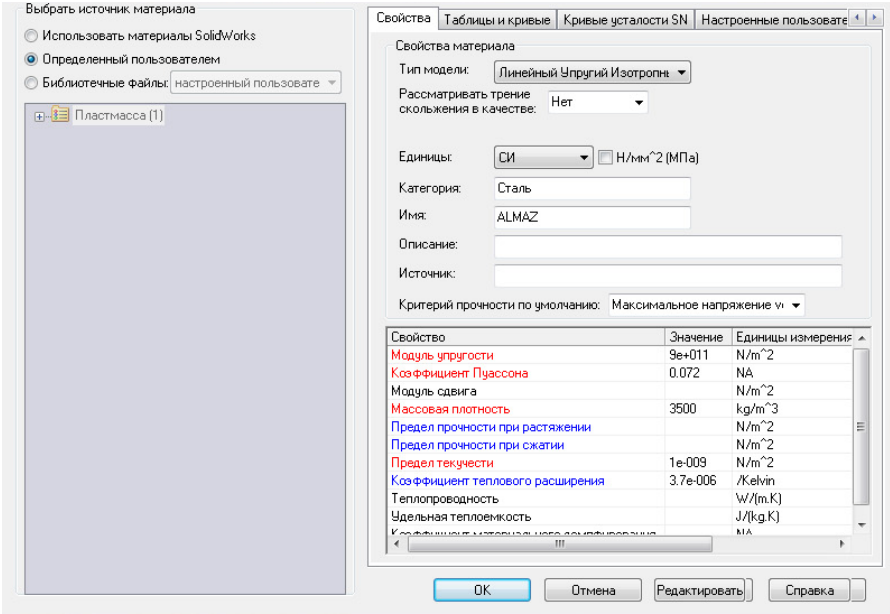


Рисунок 10 – Пример заданя физико-механический свойств зерна марки АС100

Отметим, что в исходной модели была использована связка на основе меди, в качестве ОМ – алмаз, марка алмазного зерна принималась как АС 100. Для задач как без использования УЗК, так и с их использованием все начальные условия были заданы одинаково, отличие состояло только в наличии или отсутствии самих ультразвуковых колебаний.

Следующим этапом моделирования являлось задание параметров нагружения модели. В ходе расчетного эксперимента, модель нагружалась распределенной нагрузкой приложенной к верхней грани связки, что позволяло моделировать усилие прижима алмазного шлифовального круга во время абразивной обработки. С целью моделирования подачи равномерная нагрузка прикладывалась к боковой грани связки (рис. 9, б).

Для моделирования вибрационного шлифования усилие прижима алмазного шлифовального круга варьировали во времени. Для этого усилие прижима задавалось как гармоническая нагрузка, график которой был создан заранее в виде синусоиды (рис. 11) с частотой 10÷ 50 кГц и амплитудой (А), выраженной в единицах давления.

Влияние вибрационных колебаний на НДС зоны шлифования. В исходной модели рассматривалось алмазное зерно марки АС100 зернистостью 200/160,

обладающее следующими прочностными характеристиками: $\sigma_{раст.}$=2,2 ГПа; $\sigma_{сж.}$=12,9 ГПа].

В первой части расчетов задавалось усилие прижима (нормальная составляющая силы резания), реализующая давление на алмазное зерно равное 2 МПа, а также величина усилия, создаваемого тангенциальной составляющей силы резания, равная 1 МПа. В качестве ОМ принят алмаз, а связка на основе меди.

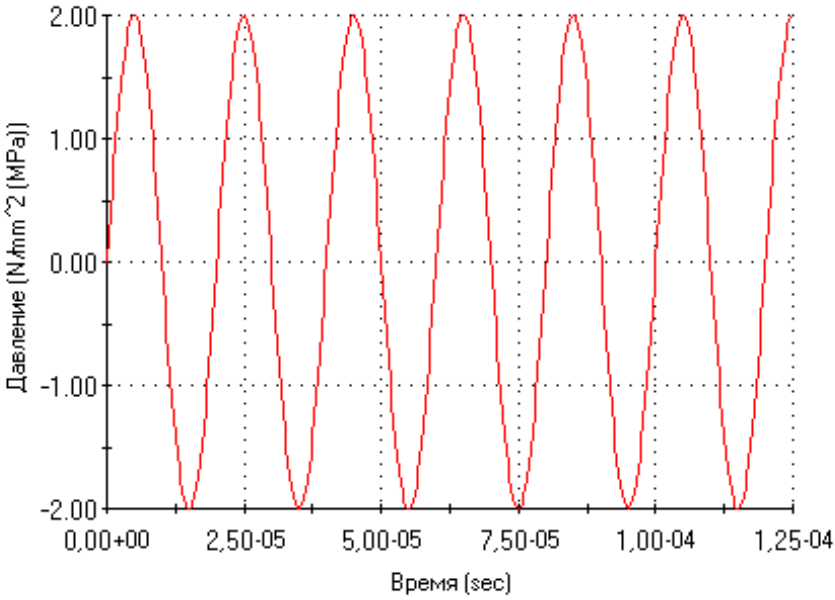
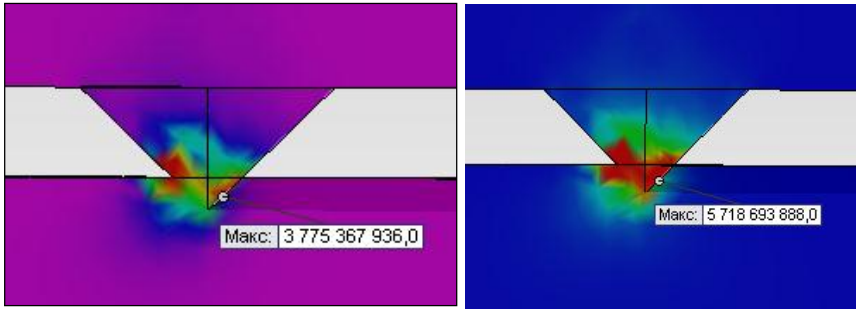


Рисунок 11 – График гармонической нагрузки (f =50 кГц , А=2 МПа)

Для моделирования вибрационного шлифования усилие прижима задавалось с частотой колебаний f =50 кГц (рис. 11). Задачей исследования на данном этапе являлось определение влияния ультразвуковых колебаний на производительность шлифования путем определения НДС зоны обработки (рис. 12). При этом в качестве косвенного параметра, характеризующего производительность, служила величина эквивалентных напряжений $\sigma_{экв.}$

На основании проведенных модельных экспериментов по определению НДС зоны шлифования можно сделать вывод о существенном влиянии УЗК на объем разрушенного материала.



а) б)

Рисунок 12 – Уровень $\sigma_{экв.}$ при шлифовании без УЗК (а) и с УЗК (б)

Проведенные расчеты показали, что с повышением частоты УЗК, прикладываемых к модели, НДС в зоне резания существенно меняется. Этот эффект можно использовать на практике. Путем изменения частоты УЗК появляется возможность существенно снизить гамму шлифовальных кругов в плане их характеристик. Т.е. используя круги ограниченного диапазона характеристик, можно достичь таких же результатов, для получения которых ранее требовались шлифовальные круги довольно большого набора характеристик.

Таким образом, расчеты НДС зоны шлифования указывают на существенное влияние УЗК на объем разрушенного ОМ, свидетельством чему служит увеличение $\sigma_{экв.}$ в зоне шлифования в 1,5 – 2 раза.

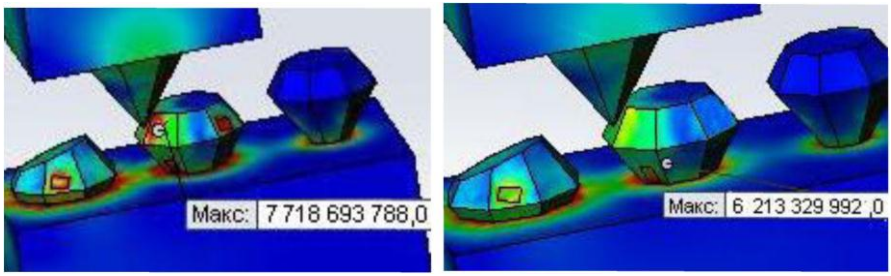
Трехмерное моделирование процесса правки абразивных кругов алмазным инструментом. 3D моделирование процесса правки алмазных кругов алмазным карандашом позволяет в компьютерном режиме определять рациональные режимы (скорость круга, подача, глубина правки) для конкретных марок абразивных зерен и связок. При этом представляется возможным проследить изменение характера и объемы разрушения абразивных зерен от субмикро– до микро– и макроразрушения, что позволяет обеспечивать рациональные параметры РПК и получать требуемое качество обработанной поверхности.

В программном пакете COSMOS рассчитаны поля главных и приведенных напряжений, энергии и плотности энергии деформации при различных режимах правки.

Изучение влияния количества металлофазы показало увеличение напряжений в зернах в местах сосредоточения металлофазы. Установлено, что увеличение количества металлических включений в зернах приводит к снижению их прочности и термостойкости.

Из эпюр напряжений видно, что наибольшие напряжения

сконцентрированы в области металлофазы и именно она играет ключевую роль в разрушении алмазных зерен в процессе правки алмазно-абразивного инструмента. Моделировании процесса правки с зернами с тремя включениями металлофазы показали наличие больших напряжений по сравнению с зернами с одним включением (рис. 13). Можно сделать вывод, что правка кругов с большим количеством включений в алмазных зернах проходит более интенсивно.



а) б)

Рисунок 13 – Влияние количественного содержания металлофазы в зерне на изменение эквивалентных напряжений, возникающих в зоне правки алмазоносного слоя: а) - содержание металлофазы -10%, б) - содержание металлофазы - 5%

Трехмерное моделирование процесса заточки лезвийного инструмента из АКМ [2]. Широкое применение лезвийного инструмента из АКМ сдерживается относительно невысокой надежностью его эксплуатации. Этот недостаток обусловлен несовершенством процессов синтеза (получения) АКМ: наличием остаточных напряжений, внутренних дефектов, которые проявляются даже после заточки инструмента, то есть в процессе его эксплуатации. Образование микротрещин на поверхности АКМ может быть результатом действия одного или сразу нескольких механизмов термосилового разрушения, обусловленных различием коэффициентов термического расширения алмазных кристаллитов и металлофазы, окислением меж- и внутрикристаллитных включений АКМ и др.

Включения металла-катализатора сохраняются в АКМ и алмазных зернах после синтеза и концентрируются преимущественно в плоскости (111) [10]. Существенное различие величин коэффициентов термического расширения алмаза и металлофазы, а также анизотропия теплофизических свойств кристаллитов АКМ и алмазных зерен могут влиять как на процесс микроразрушения (съем припуска), так и на макроразрушение (образование дефектного слоя) при шлифовании. По-видимому, это является одной из

причин образования трещин на резцах из АКМ при заточке их кругами на органической связке. Указанный вывод подтверждается еще и тем, что в ювелирных алмазах, которые не содержат включений, и обработка которых сопровождается значительными температурами (до 600 - 700 С°), трещины не образуются. Визуальный контроль после заточки и доводки не гарантирует надежность работы такого инструмента.

По данным Н.В. Новикова и Л.Н. Девина [11] вероятность разрушения резцов из сверхтвердых материалов даже при чистовом точении может достигать 47%. Авторы обоснованно связывают надежность с предельными напряжениями на передней и задней гранях резца при резании. Используя вероятностные методы расчета они учитывают влияние только силового фактора на разрушение АКМ, однако не рассматривают влияние температуры в зоне резания.

В связи с этим нами была сделана попытка разработки методологии заточки лезвийного инструмента, обеспечивающей его надежность уже на этапе изготовления.

Использование метода конечных элементов в пакете программ позволяет определять НДС исследуемого объекта, вызванное как отдельно силовыми и температурными факторами, так и их суммарным воздействием.

Для повышения надежности лезвийного инструмента из АКМ предложен новый методологический подход, позволяющий определять надежность такого инструмента еще на этапе его заточки. При этом процесс заточки и доводки лезвийного инструмента осуществляется в термосиловых условиях, близких к условиям его эксплуатации, т. е. характеризуется наличием высоких давлений и температур как в зоне шлифования (при его заточке), так и в зоне резания (при эксплуатации инструмента из АКМ). Целесообразно так затачивать и доводить лезвийные инструменты из АКМ, чтобы дефекты, полученные при синтезе, проявлялись до их эксплуатации, т. е. отбраковка производилась бы еще на стадии их изготовления.

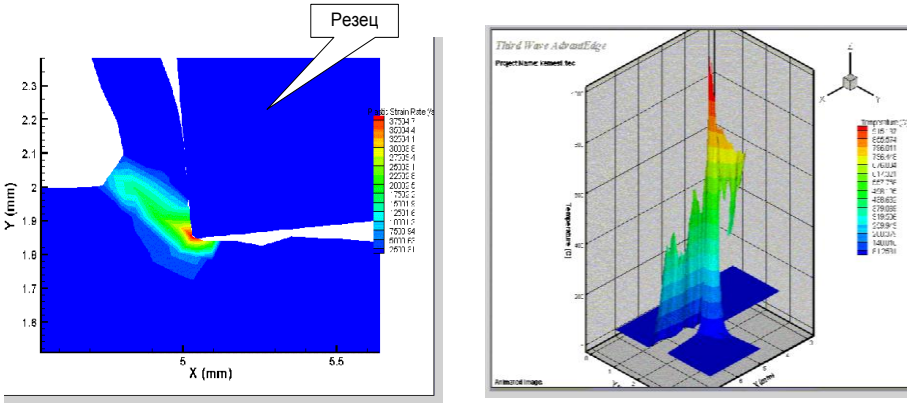
Поскольку в процессе эксплуатации лезвийный инструмент часто испытывает более жесткие термосиловые нагрузки, чем в процессе его заточки и доводки, представляется нецелесообразным выбор щадящих условий его заточки и доводки. Поступая таким образом изготовители лезвийного инструмента из АКМ не гарантируют, что такой инструмент в более жестких термосиловых условиях эксплуатации окажется надежным. В связи с этим уже на стадии заточки и доводки лезвийного инструмента необходимо создавать в нем термосиловые нагрузки, эквивалентные или даже несколько превышающие те, которые этот инструмент будет испытывать в экстремальных условиях его эксплуатации.

Алгоритм осуществления данного подхода следующий. Вначале с помощью пакета прикладных программ методом конечных элементов

рассчитываются предельные термосиловые напряжения в режущем клине резца при экстремальных условиях его эксплуатации.

Для этого трехмерная модель лезвийного инструмента нагружается силой резания и температурой до величины, несколько превышающей те значения, которые этот инструмент может испытывать в экстремальных условиях его эксплуатации. Термосиловые 3D НДС при лезвийной обработке различных материалов можно получить путем моделирования процесса резания в специализированном программном пакете Third Wave AdvantEdge.

При этом достаточно в построенную модель ввести физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материалов, экстремальные режимы резания и можно рассчитать приведенные напряжения, энергию деформации, плотность энергии деформации, главные напряжения и температуру в зоне резания. Пример расчета температуры в зоне резания меди приведен на рис. 14.



а) б)

Рисунок 14 – Модель процесса лезвийной обработки (а)
и результаты расчета температуры в зоне резания (б)

Полученные значения термосиловых напряжений являются базовыми для решения обратной задачи – нахождения режимов и условий заточки по известному напряженному состоянию резца из АКМ в экстремальных условиях его работы.

Применяемый пакет позволил решить задачу в трехмерном измерении, что выгодно отличает данную методику от применявшейся ранее другими авторами. В ходе решения обратной задачи пакет позволяет по известному уровню эксплуатационных термосиловых напряжений определить скорость

шлифования, поперечную подачу, нормальное давление в контакте для конкретных физико-механических свойств шлифуемого АКМ, алмазных зерен и связки шлифовального круга.

Полученные в ходе решения обратной задачи значения режимов алмазного шлифования обеспечат наличие в модели затачиваемого АКМ термосиловых напряжений, превышающих эксплуатационные. Таким образом, определяются условия заточки, при которых дефекты АКМ вскрываются еще на стадии изготовления инструмента.

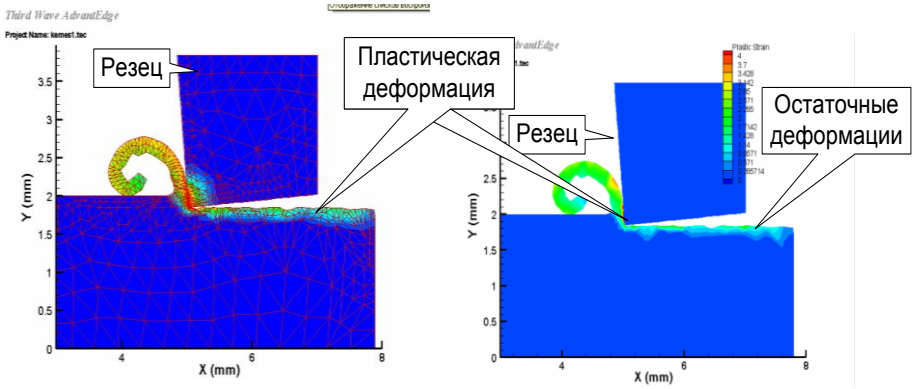
Следовательно, исходной информацией при назначении режимов заточки и доводки лезвийного инструмента из АКМ должны являться силы резания и температуры, которые этот инструмент будет испытывать в экстремальных условиях его эксплуатации. Приложив эти силы и контактные температуры к модели резца, методом конечных элементов определяем величину предельных термосиловых напряжений, которые будет испытывать это резец в процессе работы. Далее, решая обратную задачу, подбирают такие режимы заточки (скорость, подачу и т. д.), которые обеспечат наличие в модели затачиваемого АКМ термосиловых напряжений, превышающих эксплуатационные. Тем самым определяются условия заточки и доводки, при которых дефекты синтеза АКМ должны проявиться еще на стадии изготовления.

Исследование процесса лезвийной обработки инструментами из АКМ. Для компьютерного исследования процесса лезвийной обработки инструментами из АКМ использован специализированный программный пакет «Third Wave Advant Edge», созданный для этих процессов и базирующийся на методе конечных элементов.

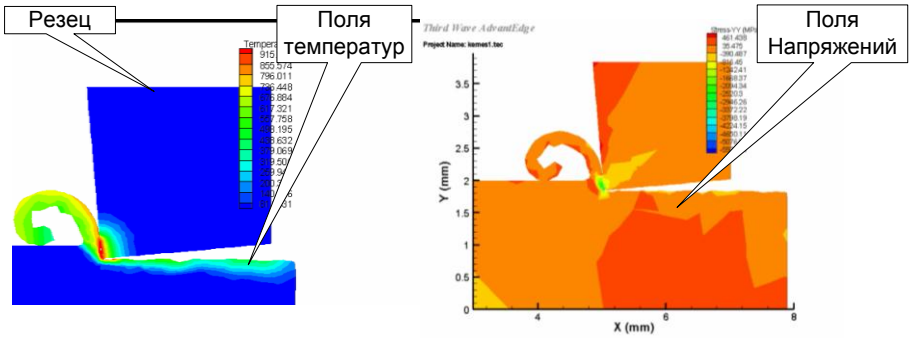
Программа позволяет при реальных режимах резания (скорость, подача, глубина) для различной геометрии режущего инструмента определять поля напряжений и деформаций, температурные поля в зоне резания и величину остаточных напряжений в обработанной поверхности (рис. 15).

Компьютерная обработка результатов моделирования процесса лезвийной обработки позволяет определять динамику изменения сил резания (рис. 16), а также изменение напряжений и температур в поверхностном слое материала в зависимости от удаления от зоны контакта (рис 17).

Таким образом, моделирование процесса лезвийной обработки инструментами из АКМ позволяет в компьютерном режиме проводить модельные эксперименты по исследованию влияния физико-механических свойств обрабатываемых материалов, геометрии инструмента и режимов резания на выходные показатели процесса.



а) б)



в) г)

Рисунок 15 – КЭ модель процесса резания (а) и результаты расчета деформаций (б), температурных (в) и полей приведенных напряжений (г) в зоне резания

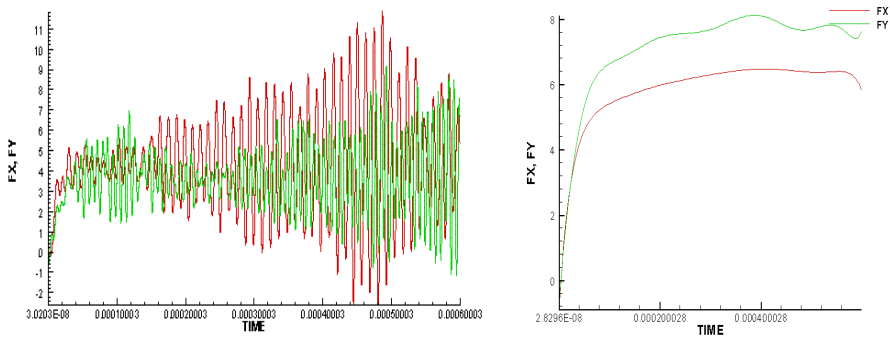
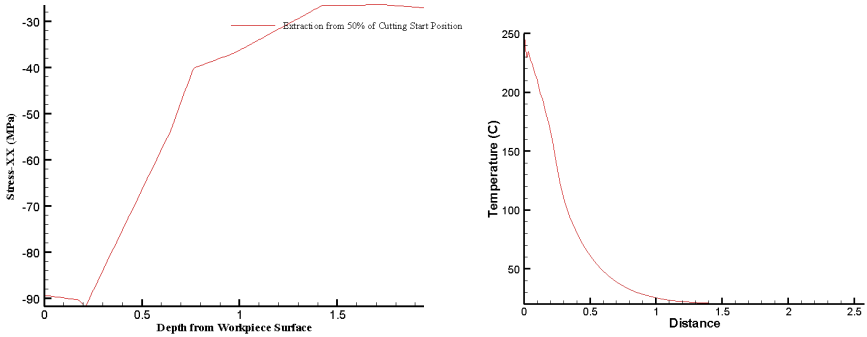


Рисунок 16 – Динамика изменения нормальной (FY)
и тангенциальной (FX) составляющих силы резания



а) б)

Рисунок 17 – Результаты расчета зависимости напряжений и температур в поверхностном слое от удаления от зоны контакта

Выводы и перспективы развития

1. Разработана и обоснована методология 3D моделирования процессов изготовления, обработки и эксплуатации АКМ.

2. Предложена и обоснована методология 3D моделирования термосилового НДС зоны спекания АКМ и зоны шлифования как единой системы «ОМ – зерно – металлофаза - связка», которая включает экспериментальное изучение 3D топографии взаимодействующих поверхностей лазерным сканированием. На этой основе создана имитационная 3D модель НДС системы «кристаллиты алмаза – металлофаза –

зерно - связка», которая позволяет анализировать её поведение в зависимости от условий спекания и обработки, характеристик кругов с учетом анизотропии зерен и наличия или отсутствия СОТС.

3. Впервые на базе 3D моделирования НДС в АКМ, возникающего в процессе спекания его компонентов определены рациональные композиции марок, зернистостей и концентраций алмазных зерен с марками металлической, керамической и органической связок, которые обеспечивают целостность зёрен в АКМ. Установлено, что снижение концентрации алмазов в круге до 5-40 % позволяет при оптимальном выборе их марки, зернистости и марки связки обеспечить минимальную дефектность зерен круга. Разработаны научно обоснованные рекомендации по оптимальным составам алмазно-металлических и керамических композиций для изготовления шлифовальных кругов.

4. Разработаны теоретические основы и средства реализации методологии компьютерного 3D моделирования физических явлений для определения оптимальных ресурсосберегающих процессов правки абразивных кругов, прецизионной абразивной и лезвийной обработки инструментами из АКМ.

5. На основе разработанной методологии открывается возможность создания экспертной системы для создания эффективных технологических ресурсосберегающих комбинированных процессов прецизионной обработки АКМ с учётом анизотропии их свойств. Предложенная методология дает возможность разработать высокоэффективные технологические процессы предварительной и прецизионной обработки различных АКМ, которые позволят в 1,5 - 2 раза повысить производительность, на 30-40% сократить расход дорогостоящих алмазных зёрен и на 20-40% повысить надёжность лезвийного инструмента из сверхтвёрдых материалов, что очень важно в случае его использования в автоматизированном производстве. Разработанная экспертная система для прогнозирования и оптимизации процессов производства и эксплуатации алмазно-абразивного инструменте существенно ускорит процесс технологической подготовки производства.

Список использованных источников: **1.** Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении: Уч. пособие / Под. ред. *А.И. Грабченко*. - Харьков: ХГПУ, 1999. - 436 с. **2.** 3D методология исследования процессов алмазно-абразивной обработки // Современные технологии в машиностроении: Сб. науч. статей. Под ред. *А.И. Грабченко*. - Том 1. - Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. - С. 64-84. **3.** Информационные технологии в наукоемком машиностроении: Компьютерное обеспечение индустриального бизнеса/Под общ. ред. А.Г. Братухина.-К.: Техніка, 2001. -728 с. **4.** *Новиков Н.В., Воронин Г.А.* Расчет напряженно-деформированного состояния кристаллов синтетических алмазов методом конечных элементов. - Сверхтвердые материалы, 1983, № 1, с. 13-16. **5.** *Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н.* Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов. - Киев: Наук. думка, 1993. - 220 с. **6.** *Грабченко А.И., Федорович В.А., Образков Б.В.* Роль концентрации алмазов в круге при шлифовании поликристаллов сверхтвердых материалов // Сверхтвердые материалы.-1984.-Вып.1.-С.49-52. **7.** *Козакова Н.В., Федорович В.А.* Оценка влияния размера и концентрации зерен на их

целостность при спекании алмазных кругов на металлических связках // Междунар. науч.-техн. сб. «Резание и инструмент в технологических системах», Харьков, НТУ «ХПИ», 2006. Вып. 71. - С. 64 – 71. **8**. *Федорович В.А.* Разработка научных основ и способов практической реализации управления приспосабливаемостью при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: Дис...докт. техн. наук: 05.03.01. - Харьков, 2002. - 469 с**. 9**. *Кумабэ Д.* Вибрационное резание. Пер. с яп. С.Л. Масленникова / Под ред. И.И. Портнова, В.В. Белова. - М.: Машиностроение, 1985. - 424 с. **10**. *Новиков Н.В., Примак Л.П.* и др. Исследование распространения усталостных трещин в монокристаллах синтетических алмазов // ДАН СССР. - 1981. - Вып. 256. - С. 1122-1126. **11**. *Новиков Н.В., Девин Л.Н.* Надежность лезвийных инструментов из ПАКМ при чистовом точении закаленных сталей // Сб. науч. тр. Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины. Серия Г: Процессы механической обработки, станки и инструменты. - Киев, 2002. - С. 273-280.

Bibliography (transliterated): 1. Rabochie processy vysokih tehnologij v mashinostroenii: Uch. posobie / Pod. red. *A.I. Grabchenko*. - Har'kov: HGPU, 1999. - 436 s. **2**. 3D metodologija issledovanija processov almazno-abrazivnoj obrabotki // Sovremennye tehnologii v mashinostroenii: Sb. nauch. statej. Pod red. *A.I. Grabchenko*. - Tom 1. - Har'kov: NTU «HPI», 2006. - C. 64-84. **3**. Informacionnye tehnologii v naukoemkom mashinostroenii: Komp'juternoe obespechenie industrial'nogo biznesa/Pod obshh. red. *A.G. Bratuhina*.-K.: Tehnika, 2001. -728 s. **4**. Novikov N.V., Voronin G.A. Raschet naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija kristallov sinteticheskih almazov metodom konechnyh jelementov. - Sverhtverdye materialy, 1983, № 1, s. 13-16. **5**. *Novikov N.V., Majstrenko A.L., Kulakovskij* V.N. Soprotivlenie razrusheniju sverhtverdyh kompozicionnyh materialov. - Kiev: Nauk. dumka, 1993. - 220 s. 6. Grabchenko A.I., Fedorovich V.A., Obrazkov B.V. Rol' koncentracii almazov v kruge pri shlifovanii polikristallov sverhtverdyh materialov // Sverhtverdye materialy.-1984.-Vyp.1.-S.49-52. **7**. *Kozakova N.V., Fedorovich V.A.* Ocenka vlijanija razmera i koncentracii zeren na ih celostnost' pri spekanii almaznyh krugov na metallicheskih svjazkah // Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. «Rezanie i instrument v tehnologicheskih sistemah», Har'kov, NTU «HPI», 2006. Vyp. 71. - C. 64 – 71. **8.** *Fedorovich V.A.* Razrabotka nauchnyh osnov i sposobov prakticheskoj realizacii upravlenija prisposablivaemost'ju pri almaznom shlifovanii sverhtverdyh materialov: Dis...dokt. tehn. nauk: 05.03.01. - Har'kov, 2002. - 469 s. **9**. Kumabje D. Vibracionnoe rezanie. Per. s jap. S.L. Maslennikova / Pod red. I.I. Portnova, V.V. Belova. - M.: Mashinostroenie, 1985. - 424 s. **10**. Novikov N.V., Primak L.P. i dr. Issledovanie rasprostranenija ustalostnyh treshhin v monokristallah sinteticheskih almazov // DAN SSSR. - 1981. - Vyp. 256. - S. 1122-1126. **11**. Novikov N.V., Devin L.N. Nadezhnost' lezvijnyh instrumentov iz PAKM pri chistovom tochenii zakalennyh stalej // Sb. nauch. tr. Instituta sverhtverdyh materialov im. V.N. Bakulja NAN Ukrainy. Serija G: Processy mehanicheskoj obrabotki, stanki i instrumenty. - Kiev, 2002. - S. 273-280.

УДК 621.922.34

М. М. ШЕЙКО, д-р техн. наук,
В. М. СКОК, Київ, Україна

ФОРМУВАННЯ АЛМАЗНО-ГАЛЬВАНІЧНОГО ПОКРИТТЯ З ПРОТЕКЦІЄЮ АЛМАЗНИМ МІКРОПОРОШКОМ В ПРАВЯЧОМУ ІНСТРУМЕНТІ

Запропоновано спосіб протекції алмазно-гальванічного покриття (АГП) в правлячому інструменті, що полягає у використанні алмазного мікропорошку, який міститься в поверхневому шарі нікелевого зв'язуючого АГП і що захищає поверхню зв'язуючого від гідроабразивного зносу. Розрахунок режиму формування АГП передбачає обчислення швидкості і часу зарощування, а також кінцевої товщини АГП і його захисного підшару.
Ключові слова: протекція алмазно-гальванічного покриття, алмазний мікропорошок

Предложен способ протекции алмазно-гальванического покрытия (АГП) в правящем инструменте, заключающийся в использовании алмазного микропорошка, содержащегося в поверхностном слое никелевой связки АГП и защищающего поверхность связки от гидроабразивного износа. Расчет режима формирования АГП предполагает вычисление скорости и времени заращивания, а также конечной толщины АГП и его защитного подслоя.
Ключевые слова: протекция алмазно-гальванического покрытия, алмазный микропорошок

This paper proposes a method of a protection of diamond-galvanic covering (DGC) in dress tool. The method is to use a diamond micro-powder contained in the surface layer of nickel ligament DGC and protect the ligaments from hydroabrasive wear. The calculation of the formative mode AGP includes the calculation of speed, time of overgrowth and finite thickness DGC and protective sublayer.
Keywords: protection of diamond-galvanic covering, diamond micro-powder

Якщо до недавнього для алмазного правлячого інструменту, що працює по абразивному матеріалу шліфувальних кругів, були доступні лише марки АС32 [1, 2], то зараз в практиці виготовлення і застосування правлячого інструменту – перш за все алмазних роликів і брусків, виготовлених методом гальванопластики, – використовуються синтетичні алмази марок АС100…АС200Т і вище. У зв'язку з цим баланс витрати алмазів перерозподіляється від абразивного зносу алмазів в бік збільшення відносного обсягу ще не зношених алмазних зерен, що вириваються зі зв'язуючого. Цей феномен детально досліджено в роботах [3, 4] і пояснюється гідроабразивним зносом нікелевого зв'язуючого правлячого інструменту шламом диспергованого матеріалу абразивних шліфувальних кругів, ослабленням закладення алмазних зерен. Закон гідроабразивного зносу відображає зміну об’єму кишень в міжзеренному просторі робочого шару інструменту від обсягу диспергованого матеріалу кругів. З аналізу відповідних формул випливає, що питомий об’єм кишень ω зростає і асимптотично наближається до граничного значення ω_{max}. Часто це граничне

© М. М. Шейко, В. М. Скок, 2016

значення ω_{max}, залежне від режимів правки і характеристик одношарового алмазно-гальванічного покриття (АГП), настільки велике, що відповідне йому закладення зерен не здатне утримати їх від виривання. На практиці це відбувається на виступаючих вершинах робочого профілю правлячого інструменту, наприклад, вершинах різьбового профілю. Внаслідок цього інструмент з невикористаним в цілому ресурсом знімається з операції в аварійному порядку.

Для забезпечення високих алмазоутримуючих властивостей осаджуваного нікелю і протистояння гідроабразивному зносу раніше було вжито заходів, націлених на зміну фізико-механічних властивостей цього електроосадженого зв'язуючого. Перш за все, це додавання в сульфамінові електроліти кобальту [2]. Поліпшення алмазоутримання нікель-кобальтових сплавів в порівнянні з нікелем пояснювалося істотним збільшенням його твердості – від 1,9 до 4,6 ГПа. При цьому значно знижувався знос таких осаджень, що носить гідроабразивний характер. Зворотний бік такого підходу – значне (в кілька разів) збільшення внутрішніх напружень осаду і спотворення робочого профілю, що для прецизійного правлячого інструменту неприпустимо.

Другий метод, що практикується для зміни фізико-механічних властивостей електроосадженого нікелю, – це застосування ультрадисперсних алмазів (УДА) розміром 4...6 нм, промислове виробництво яких налагоджено на НВО «Сінта» [5]. Принцип дії УДА полягав у спільному осадженні з нікелем. Це сприяло утворенню дрібнокристалічної, міцної, ізометричної структури гальванічного осаду. Рівномірний розподіл в об'ємі металевої матриці забезпечувало зниження напружень і зменшення дефектів гальванічного покриття. За твердженням авторів [5], також підвищувалася твердість і зносостійкість. Необхідно підкреслити – ефект застосування УДА був пов'язаний зі зміною фізико-механічних властивостей гальванічного шару зарощування, але ніяк не з його механічної протекцією. Доказом того, що УДА не могли мати ефекту механічного захисту гальванічного шару зарощування, є вельми мала об'ємна концентрація ультрадисперсних алмазів в шарі. Вона становить не більше $2{,}79 \cdot 10^{-2}$, що відповідає умовній концентрації алмазів в багатошаровому інструменті всього 11,2%.

Третій метод підвищення стійкості АГП до гідроабразивного зносу – іонно-плазмові покриття робочої поверхні правлячого інструменту [6, 7]. Цей метод спрямовано не на зміну фізико-механічних властивостей гальванічного шару зарощування, як в перших двох методах, а, скоріше, на протекцію (захист) цього шару тонким (до 15 мкм) шаром нітриду титану або карбіду титану. Ці покриття – дрібнозернисте TiC/Co і крупнозернисте TiN/Co – наносилися на модернізованій установці ВУ2МБС-М. Практичний ефект уповільнення гідроабразивного зносу зв'язуючого алмазного правлячого інструменту спостерігався тільки при її покритті TiN/Co, а покриття TiC/Co

виявилося неефективним, ймовірно, в силу меншої адгезії до підкладки. Крім того, цим методом притаманні інші недоліки – обмежені габарити інструменту для розміщення в камері, необхідність зміцнення оболочної конструкції інструменту, що виключає заливку сплаву Вуда, температура плавлення якого нижче технологічної температури нанесення іонно-плазмового покриття. На практиці метод нанесення іонно-плазмового покриття для алмазних правлячих роликів неприйнятний.

Щоб захистити нікелеве зв'язуюче від потоку шламу диспергованого матеріалу круга, що заправляється, авторами в даній роботі пропонується захисний алмазно-нікелевий підшар, що представляє собою алмазний мікропорошок максимально можливої об'ємної концентрації, закріплений гальванічно осадженим нікелем. На відміну від покриття нітридом титану, що має товщину кілька мікрометрів, алмазно-нікелевий захисний підшар формується товстим, порівнянним з величиною алмазного зерна основної фракції. При цьому захисна дія підшару стійке і не схильне до випадкового руйнування, як тонке покриття.

Залишаючи розгляд робочих характеристик правлячого інструменту з протекцією до наступного огляду, зупинимося на конструкційному і технологічному рішенню створення такого підшару. Для правлячого інструменту, виготовленого методом гальванопластики, – алмазних роликів – захисний підшар з алмазного мікропорошку формується після попереднього закріплення алмазних зерен основної фракції на поверхні графітової форми, зворотної до робочої поверхні інструменту [1, 2]. Графітова форма, що закрита з двох сторін іонообмінними мембранами, поміщається в камеру, забезпечену приводом обертання, і монтується таким чином, щоб забезпечити вільний доступ електроліту до поверхні нікелю, що осаджується, і контакт технологічного запасу мікропорошку як сипучого матеріалу з тією ж поверхнею. Ступінь занурення графітової форми в електроліт (рис. 1) повинна гарантувати виконання умови, згідно з якою номінальна площа осадження нікелю не повинна перевищувати поточну номінальну площу контакту алмазного мікропорошку з графітової формою. В іншому випадку об'ємна концентрація мікропорошку в алмазно-нікелевому підшарі буде примусово знижуватися, що нівелює захисні властивості цього підшару.

Номінальну площу осадження нікелю, а також навіску алмазного мікропорошку з відомою точністю можна розрахувати з урахуванням деяких спрощень. Так, висота профілю робочої поверхні правлячого ролика (а, отже, і графітової форми) набагато менше радіуса R, тому шукану номінальну площу можна розрахувати як частку φ/π (рис. 1) від площі периферійної поверхні тіла обертання.

Оцінка маси мікропорошку проводиться вважаючи, що при обертанні графітової форми навколо горизонтальній осі мікропорошок – як сипучий матеріал – пересипається від дільниці до дільниці внутрішнього об’єму

форми, зберігаючи в динаміці форму прямої криволінійної призми висотою b, а в основі якої лежить кругової сегмент радіусом R, висотою H і центральним кутом 2φ. Її об'єм обчислюється елементарно, а об'ємна щільність мікропорошку оцінюється як $0{,}62\gamma_{\text{а}}$ [8], де $\gamma_{\text{а}}$ – щільність алмаза. Тоді технологічний запас навіски алмазного мікропорошку $m_{\text{а}} \geq 0{,}62\gamma_{\text{а}} V_{\text{приз}}$.

Площа внутрішньої периферійної поверхні графітової форми – величина індивідуальна для кожного типорозміру правлячого інструменту. Основна фракція алмазного порошку – в серії експериментів з відпрацювання технології нанесення АГП з протекцією – представлена маркою АС200Т і зернистістю 400/315, а захисний підшар алмазного мікропорошку – АСН 40/28. Виходячи з обраного типорозміру (рис. 2), були задані і обчислені наступні параметри занурення внутрішнього об'єму графітової форми в електроліт: $R = 62$ мм, $H = 31$ мм, $b = 16$ мм, $\varphi = \pi/3$, $V_{\text{приз}} = 37775$ мм^3, $m_{\text{а}} = 82\,г = 410\,ct$.

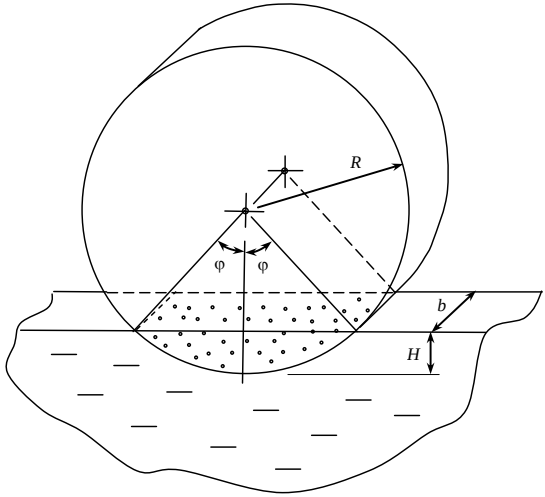


Рисунок 1 – Внутрішній об'єм графітової форми, – у вигляді тіла обертання максимального радіусу R і висотою b, – занурений на глибину H в електроліт і частково заповнений технологічним запасом алмазного мікропорошку

Для розрахунку режимів осадження нікелю, по-перше, необхідні значення загальної площі S_0 поверхні графітової форми, що знаходиться під

електролітом, і площі S_1 поверхні під основною фракцією алмазного порошку (400/315) і зануреної в електроліт. Вони відповідно дорівнюють:

$$S_0 = 8017\frac{\pi/3}{\pi} = 2672\ (\text{мм}^2), \qquad S_1 = 5492\frac{\pi/3}{\pi} = 1831\ (\text{мм}^2).$$

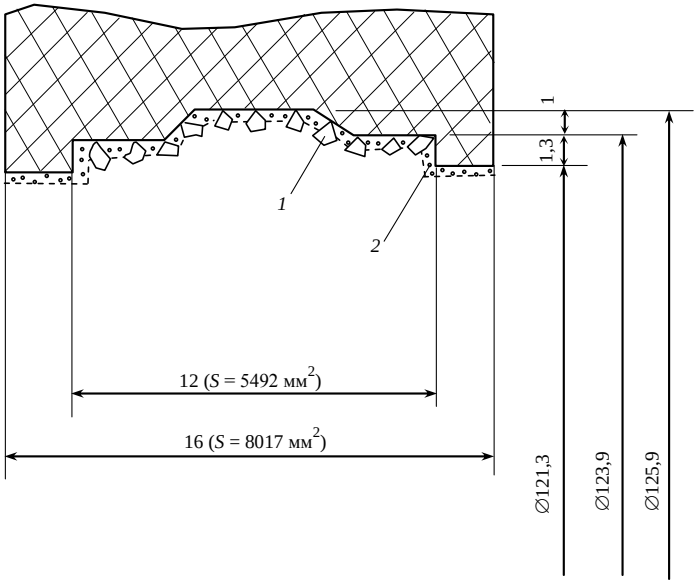


Рисунок 2 – Фрагмент графітової форми (в радіальному перетині) і її внутрішньої периферійної поверхні як поверхні, зворотної до робочої поверхні алмазного правлячого ролика: 1 – зерна алмазного порошку основної фракції, 2 – захисний підшар алмазного мікропорошку

По-друге, для розрахунку режимів осадження нікелю необхідна наступна група даних – інформація про структуру формуємого АГП в ортогональному до робочої поверхні напрямку, тобто по глибині. На рис. 3 перший – спряжений з графітової формою – це захисний підшар товщиною h_1, що складається з алмазного мікропорошку АСН 40/28, закріпленого гальванічно осадженим нікелем. Одночасно цей подслой є частиною матриці, що утримує зерна основної фракції АС200Т 400/315. Другий підшар – лежить в інтервалі від h_1 до h_2' – це нікелева, без включення мікропорошку, матриця, що утримує зерна основної фракції. Третій – що лежить в інтервалі

глибин від h_2' до h_2 – це частина нікелевої матриці, що залишилася без алмазних зерен. Загальна товщина АГП призначається як $h_2 = 1{,}5$ мм, що, як показує досвід, забезпечує достатню жорсткість покриття при даній зернистості основної фракції. Товщина алмазного шару d_t основної фракції детально експериментально [9, 10] і теоретично [11] досліджено авторами цієї роботи. Для алмазного порошку АС200Т 400/315 вона дорівнює $d_t = 0{,}413$ мм. Глибина h_1 захисного алмазно-нікелевого підшару приймається як $1/2$ товщини d_t алмазного шару, що становить $h_1 = 0{,}207$ мм. Це створює достатній запас часу захисної дії при можливому зносі підшару і не послаблює закладення зерен основної фракції в однорідній нікелевій матриці.

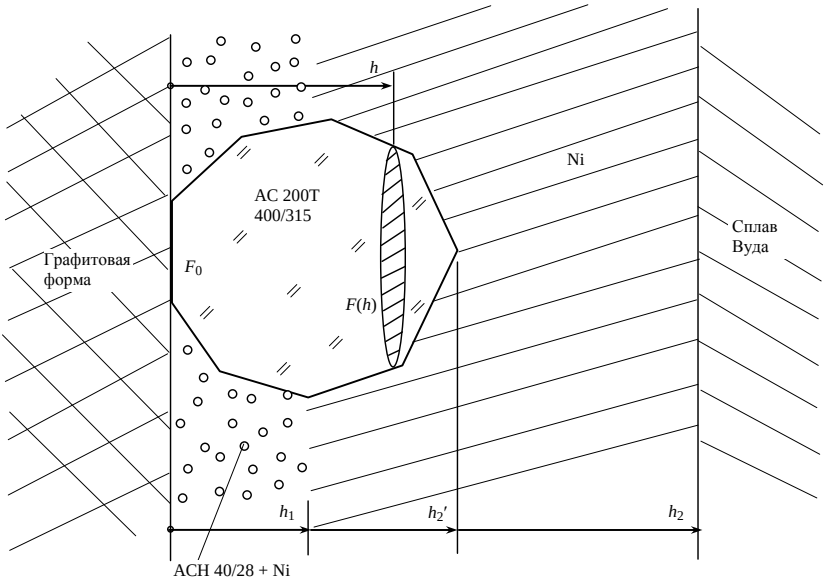


Рисунок 3 – Структура алмазно-гальванічного покриття

Третя група вихідних даних стосується характеру зміни фактичної площі вільної поверхні осадження нікелю по мірі зарощування. Номінальна площа S_0 спочатку зменшується – як показано в [11] – за рахунок сумарної площі контакту зерен основної фракції з графітової формою, потім – за рахунок сумарної площі поперечних перерізів алмазних зерен поверхнею, що

еквідистантна поверхні форми з величиною еквідістанти h, тобто в момент, коли товщина осадженого нікелю досягає величини h. Крім того, в інтервалі глибин $h \in [0, h_1]$ слід враховувати алмазний мікропорошок, що також зменшує фактичну площу осадження. Загальний вираз фактичної площі осадження нікелю на глибині h від поверхні графітової форми наступне:

$$S(h) = S_0(1 - K_V)\left(1 - \frac{S_1}{S_0} n_c F(h)\right), \quad (1)$$

де K_V – об'ємна концентрація мікропорошку у відповідному підшарі, n_c – питоме число алмазних зерен основної фракції на робочої поверхні, $F(h)$ – площа поперечного перерізу зерна основної фракції на глибині h і усереднена по всьому масиву зерен на робочій поверхні. В інтервалі глибин від 0 до h_1 величина K_V приймає значення 0,62 – як максимально можлива об'ємна концентрація [6]. На більшій глибині мікропорошок відсутній; тому формально приймається $K_V = 0$. Аналогічно питоме число n_c поза інтервалу $h \in [0, h_2']$ дорівнює 0. Умовна концентрація K алмазного порошку в правлячому інструменті згідно [8] дорівнює приблизно 180%, а питоме число для зернистості 400/315 в зазначеному інтервалі глибин $n_c = 5{,}43\ мм^{-2}$. Поперечний переріз $F(h)$ як функція глибини виведена в [11].

Нарешті четверта група даних стосується швидкості осадження нікелю. Відповідно до першого закону Фарадея [12] маса речовини, осадженого на електроді під час електролізу, пропорційна кількості електрики Q, що пройшла через електроліт:

$$m = k \cdot Q, \quad (2)$$

де k – електрохімічний еквівалент речовини, що осаджається. Останній знаходиться у відповідності з другим законом Фарадея:

$$k = \frac{A}{F \cdot Z}, \quad (3)$$

де A – атомна вага елемента, Z – його валентність, A/Z, $г/г-екв$ – химический эквивалент, F – число Фарадея ($F = 96500\ к/г-екв$). Поділивши обидві частини рівності (2) на щільність речовини, що осаждається, і на площу осадження, а потім продиференціювати рівність за

часом, отримуємо вираз для швидкості осадження в перпендикулярному поверхні осадження напрямку:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{k}{\gamma} j \,, \tag{4}$$

де j – щільність струму на поверхні катода, тобто на неізольованій поверхні графітової форми. Тут для зручності швидкість осадження позначена як похідна товщини шару h, що осаджується, за часом в формі Лагранжа. Електрохімічний еквівалент нікелю відповідно до (3) дорівнює

$$k = \frac{1}{96500\ к/г-екв}\left(\frac{58{,}71}{2}\right)\frac{г}{г-екв} = 3{,}04\,\frac{г}{к},$$

а щільність

$$\gamma = 8{,}9\cdot 10^{-3}\ г/\text{мм}^3 .$$

Тоді (4) можна переписати у вигляді

$$\frac{dh}{dt} = 3{,}4\cdot 10^{-2}\cdot j, \frac{\text{мм}}{\text{с}} \tag{5}$$

де щільність j підставляється в $А/\text{мм}^2$, а розмірність множника при ній – $\text{мм}^3/(А\cdot\text{с})$.

Тепер, на підставі вищенаведеної інформації, можна розрахувати режим осадження нікелю. Одним з визначальних параметрів є щільність струму осадження. Для нормального протікання процесу рекомендується [13, 14] значення $j_{\text{опт}} = 10^{-4}\ А/\text{мм}^2$. Як зазначалося вище, вільна площа осадження нікелю менше номінальної і змінюється з ростом товщини шару, що осаджується. Внаслідок цього при постійній силі струму в ланцюзі щільність струму змінна і її варіація значна. В ідеальному випадку слід підібрати програму зміни в часі сили струму так, щоб щільність була постійна і дорівнювала $j_{\text{опт}}$. На практиці АГП розбивається по глибині на кілька ділянок і в межах кожної з них забезпечується своє постійне значення струму. При цьому варіація щільності струму не повинна виходити за допустимі межі.

Сила струму I_i на ділянці АГП в межах глибини, скажімо, від h_{i-1} до h_i знаходиться з умови того, що середня на ділянці щільність струму дорівнює оптимальній рекомендованій:

$$j \equiv I_i \overline{\left(\frac{1}{S(h)} \right)} = j_{\text{опт}}, \tag{6}$$

де усереднення зворотної площі $S(h)$ проводиться по h. З (6) шукана сила струму на і-тій ділянці обчислюється як

$$I_i = \frac{j_{\text{опт}} S_0 (1 - K_V)(h_i - h_{i-1})}{\int\limits_{h_{i-1}}^{h_i} \frac{dx}{1 - \frac{S_1}{S_0} n_c F(x)}}. \tag{7}$$

Тоді поточна щільність – як функція товщини осадженого шару – дорівнює

$$j(h) = \frac{I_i}{S_0 (1 - K_V) \left(1 - \frac{S_1}{S_0} n_c F(h) \right)}, \tag{8}$$

де параметри K_V і n_c, як зазначено в коментарях до (1), отримують значення в залежності від розглянутого інтервалу. Якщо варіація щільності (8) не перевищує граничних значень, інтервал глибин h і струм I_i обрані правильно. Другий найважливіший параметр процесу осадження нікелю – це час осадження t. Для i-тої ділянки:

$$t_i = \int\limits_{h_{i-1}}^{h_i} \frac{dx}{\frac{dh}{dt}(x)} = \frac{S_0 (1 - K_V)}{3{,}4 \cdot 10^{-2} I_i} \int\limits_{h_{i-1}}^{h_i} \left(1 - \frac{S_1}{S_0} n_c F(x) \right) dx. \tag{9}$$

Слід врахувати, що осадження нікелю відбувається на занурену в електроліт частку φ/π довжини направляючої внутрішньої поверхні графітової форми. Отже, час знаходження в гальванічній ванні збільшується в π/φ рази.

Авторами було експериментально підібрано інтервали глибин нікелю, що осаджується, і на яких призначені постійні значення струму осадження, а отже, – призначено наступні етапи зарощування. Перший етап – це етап, на

якому здійснюється осадження нікелю спільно з алмазним мікропорошком на графітову форму з попередньо закріпленим алмазним порошком основної фракції (400/315). Інтервал глибин – від 0 до h_1. Другий етап починається з вилучення з внутрішнього об'єму графітової форми залишку технологічного запасу навіски алмазного мікропорошку – того залишку, що не закріпився на першому етапі нікелем, що осаджується. На другому етапі призначається сила струму, постійна до повного формування АГП, тобто до глибини h_2. Другий етап поділяється на два підетапи: протягом першого – зерна основної фракції зарощуються до повної висоти (питоме число n_c тут нульове), а протягом другого, найтривалішого, – відбувається формування однорідного нікелевого шару по всій номінальної площі S_0. Підсумкові розрахункові дані схематично представлені на рис. 4. Вони дають повну інформацію для призначення режимів зарощування нікелю при формуванні АГП з протекцією для правлячих роликів (гальванопластика).

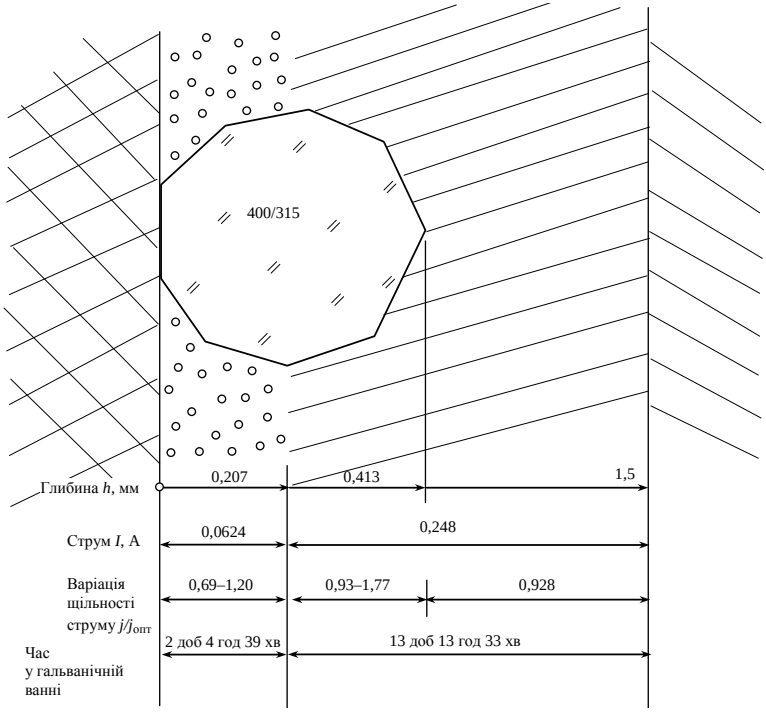


Рисунок 4 – Результати розрахунку параметрів режиму зарощування нікелю при формуванні АГП з протекцією

Результати реалізації цієї схеми і працездатність модернізованого правлячого інструменту мають позитивне значення, що буде висвітлено в наступній роботі.

Список використаних джерел: 1. *Коломиец В. В., Полупан Б. И.* Алмазные правящие ролики при врезном шлифовании деталей машин. – Киев: Наук. думка, 1983. – 144 с. **2.** *Коломиец В.В., Полупан Б. И., Химач О. В.* Алмазный инструмент фасонного профиля. – К.: Наук. думка, 1992. – 176 с. **3.** *Шейко М. Н., Мацкевич В. П. и др.* Эволюция рабочей поверхности алмазных брусков в процессе врезной правки // Сучасні процеси механічної обработки інструментами с НТМ и якість поверхні деталей машин: Зб. наук. робот (Серія Г "Процеси механічної обробки, верстати та інструменти") НАН Украини. ІНМ ім. В. М. Бакуля. – Київ, 2006. – С. 118–125. **4.** *Шейко М. Н., Бородавко Д. Н., Скок В. Н.* Эволюция рабочей поверхности алмазных правящих брусков на стадии, предшествующей ее разрушению // Сверхтвердые материалы. – 2007. – № 2. – С. 65–72. **5.** *Губаревич Т. М., Чернухо Е. Л., РощеняА.И.* Алмазно-гальванический инструмент на никелевой связке, упрочненный ультрадисперсными алмазами // Інструментальний світ. – 2002. №1(13). – С. 18–20. **6.***ЛавриненкоВ.И., Шейко М. Н. и др.* Влияние ионно-плазменных покрытий на эксплуатационные свойства алмазного правящего инструмента // Сверхтвердые материалы. – 2008. – № 6. – С. 73–80. **7.** *Шейко М. Н., Бондарь И. В.* Кинетика гидроабразивного износа связки однослойного алмазного правящего инструмента с протекцией ионно-плазменными покрытиями // Высокие технологии в машиностроении и нормативно-техническое регулирование: Сб. XX международный научно-технический семинар ИНТЕРПАРТНЕР – 2012 – Алушта, 2012. – С. 316–323. **8.** *Шейко М. Н., Скок В. Н., Лубнин А. Г.* Основные характеристики абразивно-алмазного слоя правящих иструментов // Сверхтвердые материалы. – 2007. – № 4. – С. 75–78. **9.** *Шейко М. Н., Скок В. Н.* Форма зерен как фактор, определяющий параметры алмазно-гальванического покрытия правящего инструмента. Сообщение 1. Величина занижения корпуса инструмента под нанесение алмазно-гальванического покрытия методом гальваностегии // Сверхтвердые материалы. – 2015. – № 6. – С. 86–88. **10.** *Шейко М. Н., Скок В. Н., Пасичный О. О.* Форма зерен как фактор, определяющий параметры алмазно-гальванического покрытия правящего инструмента. Сообщение 2. Фактическая площадь контакта зерен с графитовой формой и смежные характеристики как исходные для расчета режимов нанесения алмазно-гальванического покрытия методом гальванопластики // Сверхтвердые материалы. – 2016. – № 1. – С. 61–66. **11.** *Шейко М. Н.* Форма зерен как фактор, определяющий параметры алмазно- гальванического покрытия правящего инструмента. Сообщение 3. Пространственная модель алмазного зерна – «бочка параболической и круговой клепки» // Сверхтвердые материалы. – 2016. – № 3. – С. 77–81. **12.** *Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г.* Справочник по элементарной физике. – М.: Наука, 1975. – 256 с. **13.** *Лобанов С. А.* Практические советы гальванику. – Л: Машиностроение, 1983. – 248 с. **14.** *Ямпольский А. М., Ильин В. А.* Краткий справочник гальванотехника. – Л: Машиностроение, 1981. – 269 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Kolomiec V. V., Polupan B. I.* Almaznye pravjashhie roliki pri vreznom shlifovanii detalej mashin. – Kiev: Nauk. dumka, 1983. – 144 s. **2.** *Kolomiec V.V., Polupan B. I., Himach O. V.* Almaznyj instrument fasonnogo profilja. – K.: Nauk. dumka, 1992. – 176 s. **3.** *Shejko M. N., Mackevich V. P. i dr.* Jevoljucija rabochej poverhnosti almaznyh bruskov v processe vreznoj pravki // Suchasni procesi mehanichnoї obrabotki instrumentami s NTM i jakist' poverhni detalej mashin: Zb. nauk. robot (Serija G "Procesi mehanichnoї obrobki, verstati ta instrumenti") NAN Ukraini. INM im. V. M. Bakulja. – Kiïv, 2006. – S. 118–125. **4.** *Shejko M. N., Borodavko D. N., Skok V. N. Jevoljucija* rabochej poverhnosti almaznyh pravjashhih bruskov na stadii, predshestvujushhej ee razrusheniju // Sverhtverdye materialy. – 2007. – № 2. – S. 65–72. **5.** *Gubarevich T. M., Chernuho E. L., RoshhenjaA.I.* Almazno-gal'vanicheskij instrument na nikelevoj svjazke, uprochnennyj ul'tradispersnymi almazami // Instrumental'nij svit. – 2002. №1(13). – S. 18–20. **6.** *LavrinenkoV.I., Shejko M. N. i dr.* Vlijanie ionno-plazmennyh pokrytij na jekspluatacionnye svojstva almaznogo pravjashhego instrumenta

// Sverhtverdye materialy. – 2008. – № 6. – S. 73–80. **7.** *Shejko M. N., Bondar' I. V*. Kinetika gidroabrazivnogo iznosa svjazki odnoslojnogo almaznogo pravjashhego instrumenta s protekciej ionno-plazmennymi pokrytijami // Vysokie tehnologii v mashinostroenii i normativno-tehnicheskoe regulirovanie: Sb. HH mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij seminar INTERPARTNER – 2012 – Alushta, 2012. – S. 316–323. **8.** *Shejko M. N., Skok V. N., Lubnin A. G*. Osnovnye harakteristiki abrazivno-almaznogo sloja pravjashhih istrumentov // Sverhtverdye materialy. – 2007. – № 4. – S. 75–78. **9.** *Shejko M. N., Skok V.* N. Forma zeren kak faktor, opredeljajushhij parametry almazno-gal'vanicheskogo pokrytija pravjashhego instrumenta. Soobshhenie 1. Velichina zanizhenija korpusa instrumenta pod nanesenie almazno-gal'vanicheskogo pokrytija metodom gal'vanostegii // Sverhtverdye materialy. – 2015. – № 6. – S. 86–88. **10.** *Shejko M. N., Skok V. N., Pasichnyj O. O*. Forma zeren kak faktor, opredeljajushhij parametry almazno-gal'vanicheskogo pokrytija pravjashhego instrumenta. Soobshhenie 2. Fakticheskaja ploshhad' kontakta zeren s grafitovoj formoj i smezhnye harakteristiki kak ishodnye dlja rascheta rezhimov nanesenija almazno-gal'vanicheskogo pokrytija metodom gal'vanoplastiki // Sverhtverdye materialy. – 2016. – № 1. – S. 61–66. **11.** *Shejko M. N*. Forma zeren kak faktor, opredeljajushhij parametry almazno- gal'vanicheskogo pokrytija pravjashhego instrumenta. Soobshhenie 3. Prostranstvennaja model' almaznogo zerna – «bochka parabolicheskoj i krugovoj klepki» // Sverhtverdye materialy. – 2016. – № 3. – S. 77–81. **12.** *Koshkin N. I., Shirkevich M. G.* Spravochnik po jelementarnoj fizike. – M.: Nauka, 1975. – 256 s. **13.** *Lobanov S. A.* Prakticheskie sovety gal'vaniku. – L: Mashinostroenie, 1983. – 248 s. **14.** *Jampol'skij A. M*., Il'in V. A. Kratkij spravochnik gal'vanotehnika. – L: Mashinostroenie, 1981. – 269 s.

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ

УДК 621.914

Э.Р. ВАНИЕВ, канд. техн. наук,
Э.Ш. ДЖЕМИЛОВ, канд. техн. наук,
А.И. АЛИЕВ, канд. техн. наук,
Э.Л. БЕКИРОВ, Симферополь, Украина

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ПРИРАБОТКИ НА СТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ СТАЛИ 12Х18Н10Т С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ СОТС

Наведені результати досліджень впливу режимів зміцнюючого припрацювання на стійкість інструменту при фрезеруванні сталі 12Х18Н10Т. Розглянуті режими припрацювання, що забезпечують найбільшу стійкість інструменту при сухій обробці та з використанням И-20А, МР-99, рапсового та касторового мастил. Показана перевага рослинних мастил в порівнянні з іншими середовищами при фрезеруванні вказаної сталі.
Ключові слова: режими зміцнюючого припрацювання, стійкість інструменту

Приведены результаты исследований влияния режимов упрочняющей обработки на стойкость инструмента при фрезеровании стали 12Х18Н10Т. Рассмотрены режимы приработки, обеспечивающие наибольшую стойкость инструмента при обработке всухую и с применением И-20А, МР-99, рапсового и касторового масел. Показано преимущество растительных масел в сравнении с другими средами при фрезеровании указанной стали.
Ключевые слова: режимы упрочняющей приработки, стойкость инструмента

There are the results of studies of the effect of the hardening treatment modes for tool resistance when machining steel 12X18H10T. The running modes, providing the greatest tool resistance when processing dry and using I-20A, MR- 99, rapeseed and castor oils, are considered. The advantage of vegetable oils in comparison with other surroundings during milling of specified steel is showed.
Keywords: hardening treatment modes, tool resistance

Постановка задачи. Одним из ключевых вопросов повышения эффективности обработки металлов резанием является обеспечение высокого качества и физико-механических свойств контактирующих с обрабатываемым материалом поверхностей инструмента. Среди большого количества способов, обеспечивающих повышенные физико-механические свойства контактных поверхностей инструмента, является упрочнение их резанием [1-3].

В работе [4] показано, что на контактных поверхностях инструмента из быстрорежущей стали при температурах 200 ÷ 400°С при давлениях $\sigma_H \geq 500$ МПа формируются упрочненные слои, обеспечивающие 5-6 кратное повышение износостойкости инструмента при резании труднообрабатываемых материалов в среде СОТС (смазочно-охлаждающие технологические среды).

Такие условия достигаются при резании на более низких режимах в сравнении с нормативными.

© Э.Р. Ваниев, Э.Ш. Джемилов, А.И. Алиев, Э.Л. Бекиров, 2016

Исследования [5] показывают, что масляные СОТС существенно (до 60 ÷ 80%) повышают уровень контактных слоев инструмента по отношению к резанию всухую, так как в среде масел при тех же режимах упрочнения, нормальные давления превышают нижнюю границу упрочнения.

Таким образом, образование вторичных упрочненных структур зависит от вида обрабатываемого и инструментального материалов, режимов упрочнения, вида обработки и инструмента, а также от технологической среды, используемой при упрочнении резанием.

Так как упрочнение резанием осуществляется в определенном интервале температур при давлении не менее 500 МПа, то для заданных контактируемых материалов, вида обработки и инструмента при изменении режимов упрочнения в присутствии различных СОТС будут формироваться различной степени упрочненные, обеспечивающие определенное, для той или иной степени упрочнения, повышение износостойкости инструмента.

В этой связи и возникает задача определения влияния режимов упрочнения на стойкость инструмента в среде различных СОТС.

В данной статье рассматривается влияние режимов упрочняющей приработки резанием на стойкость быстрорежущего инструмента при фрезеровании стали 12Х18Н10Т всухую и с использованием различных СОТС – МР-99, И-20А, рапсового и касторового масел.

Цель исследований. Определение влияния режимов упрочняющей приработки инструмента резанием на степень его износостойкости при фрезеровании стали 12Х18Н10Т с использованием различных сред.

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [5-8] на основе исследовании показано влияние различных СОТС при определенных режимах упрочняющей приработки инструмента из быстрорежущих сталей резанием как при непрерывной обработке [3, 6, 7], так и при прерывистом резании на примере фрезерования стали 12Х18Н10Т [8].

В работе [5] при точении исследовалось влияние различных СОТС на процесс упрочнения контактируемых со стружкой поверхностей инструмента при обработке сталей 45, 12Х18Н10Т и титанового сплава ВТ-22. При этом для указанных обрабатываемых материалов предварительная приработка осуществлялась на одних и тех же значениях подачи на зуб – S = 0,2 мм/об и глубине резания – t = 0,5 мм. Режимы резания предварительной приработки и нормативные режимы резания отличались только значениями скоростей. При обработке скорость приработки принималась 12Х18Н10Т – $V_{пр}$ = 15 м/мин.

В работе [8] приведены результаты исследований влияния режимов резания, на стойкость предварительно приработанного инструмента, полученные по результатам моделирования процесса фрезерования стали 12Х18Н10Т. Моделирование проводилось в соответствии с методикой, изложенной в работе [9] при исследовании каждой из рассматриваемых сред (воздух, МР-99, И-20А, рапсовое и касторовое масла) в диапазоне изменения

приработочных режимов: скорости приработки – $V_{пр}$ = 12 ÷ 28 м/мин, подачи на зуб – S_z = 0,1 ÷ 0,3 мм/зуб и глубины – t = 0,4 ÷ 2,0 мм.

При исследовании влияния режимов резания на стойкость инструмента, его предварительная приработка осуществлялась при скорости приработки $V_{пр}$ = 12 м/мин и $V_{пр}$ = 28 м/мин, подаче на зуб S_z = 0,1 мм/зуб и S_z = 0,3 мм/зуб и глубине резания t = 0,4 мм и t = 1,2 мм.

В результате исследований установлено, что наибольший эффект упрочнения быстрорежущего инструмента достигается при наименьших значениях (в пределах их изменения при исследовании) подачи на зуб и глубины резания (за исключением И-20А). В то же время установлено, что скорость приработки зависит от исследуемой среды.

Исследование влияния режимов приработки на стойкость инструмента. Исследования влияния режимов резания на стойкость инструмента, приработанного при различных режимах приработки [8] показывают, что при обработке всухую скорость приработки в указанных пределах изменения не оказывает существенного влияния на стойкость инструмента. Поэтому с целью сокращения времени приработки её значение может быть максимальным в пределах исследований, т.е. $V_{пр}$ = 28 м/мин. Исследования показывают, что увеличение скорости приработки и подачи на зуб существенно снижает стойкость инструмента при использовании в качестве СОТС И-20А, а глубина резания не оказывает влияния. В среде МР-99 наибольшее влияние на стойкость оказывает подача на зуб при приработке, меньшее глубина резания и не оказывает существенного влияния на изменение стойкости скорость приработки.

Наибольшее влияние при приработке в среде касторового и рапсового масел оказывают подача на зуб и глубина резания. С их увеличением стойкость инструмента снижается. Особенно резкое снижение стойкости наблюдается при увеличении S_z и t при использовании касторового масла. При этом влияние подачи и глубины проявляется в тесной их взаимосвязи в зависимости от значения скорости. Наибольшее значение стойкости инструмента при использовании указанных масел достигается при $V_{пр}$ = 28 м/мин, S_z = 0,1 мм/зуб и t = 0,4 мм.

Проведенные по моделям [8] исследования показывают, что наибольшая стойкость при фрезеровании быстрорежущим инструментом стали 12Х18Н10Т в среде рассматриваемых сред обеспечивается следующими режимами приработки:

- при сухой обработке: $V_{пр}$ = 28 м/мин, S_z = 0,1 мм/зуб и t = 0,4÷0,6 мм;
- при И-20А: $V_{пр}$ = 12 ÷ 15 м/мин, S_z = 0,1 мм/зуб и t = 0,4 ÷ 2,0 мм;
- при МР-99: $V_{пр}$ = 28 м/мин, S_z= 0,1 мм/зуб и t = 0,4 ÷ 0,6 мм;
- при рапсовом масле: $V_{пр}$ = 28 м/мин, S_z = 0,1 мм/зуб и t = 0,4 ÷ 0,6 мм;
- при касторовом масле: $V_{пр}$ = 28 м/мин, S_z = 0,1 мм/зуб и t = 0,4 мм.

В указанном диапазоне изменения приработочных режимных параметров резания снижение стойкости инструмента не превышает 1-3%.

Так как наибольшее значение стойкости инструмента обеспечивается наименьшими в пределах исследований, подачами, то время приработки может значительно превышать время, необходимое для фрезерования той или иной длины поверхности детали.

Сократить время приработки можно, прежде всего увеличением подачи на зуб. Вместе с тем, как показали исследования, увеличение подачи на зуб при приработке приводит к снижению стойкости. Кроме того, согласно [8] эффект упрочнения инструмента определяется режимами его последующей эксплуатации.

Поэтому возникает задача определения влияния режимов приработки на эффект упрочнения контактных слоёв инструмента в зависимости от режимов его дальнейшей работы с использованием каждой из СОТС.

Определение влияния режимов приработки на эффект упрочнения в зависимости от режимов его эксплуатации. Исследование эффекта упрочнения быстрорежущего инструмента в зависимости от эксплуатационных режимов проводились на примере цилиндрических двузубых фрез ø100 мм [9]. Предварительная приработка этих фрез осуществлялась на следующих режимах:

- обеспечивающих наибольшую стойкость инструмента при t = 0,4 мм;
- со скоростью приработки независимо от используемой среды $V_{пр}$ = 28 м/мин, t = 0,5 мм и подачах S_z = 0,15 мм/зуб и S_z = 0,2 мм/зуб.

В качестве нормативных режимов для дальнейшей эксплуатации инструмента были выбраны S_z = 0,2 мм/зуб, t = 0,5 мм при скоростях резания V_c = 28 м/мин и V_c = 40 м/мин. За критерий затупления была принята фаска износа по задней поверхности равная $h_з$ = 0,3 мм.

Эффект от упрочнения быстрорежущего инструмента предварительно обработанного на различных режимах в присутствии каждой из СОТС определялся по отношению к стойкости неприработанного инструмента всухую со скоростью – V_c = 28 м/мин, подачей на зуб S_z = 0,2 мм/зуб и глубиной резания 0,5 мм.

Стойкость инструмента, приработанного при различных режимах упрочняющей приработки с использованием различных СОТС при фрезеровании стали 12Х18Н10Т приведены на рис.

Анализ изменения стойкости при различных режимах предварительной приработки и дальнейшей эксплуатации инструмента показывает, что эффект упрочнения быстрорежущего инструмента зависит не только от режимов упрочнения и технологической среды, но и от режима эксплуатации упрочненного инструмента. Так при нормативной скорости резания 28 м/мин при увеличении приработки подачи на зуб до 0,2 мм/зуб приводит к резкому снижению эффекта упрочнения. При этих режимах предварительной

приработки стойкость увеличивается только при использовании сред МР-99 (в 2,0 раза), рапсового масла (в 2,6 раза) и касторового (в 2,1 раза) в сравнении с обработанной всухую не приработанным инструментом.

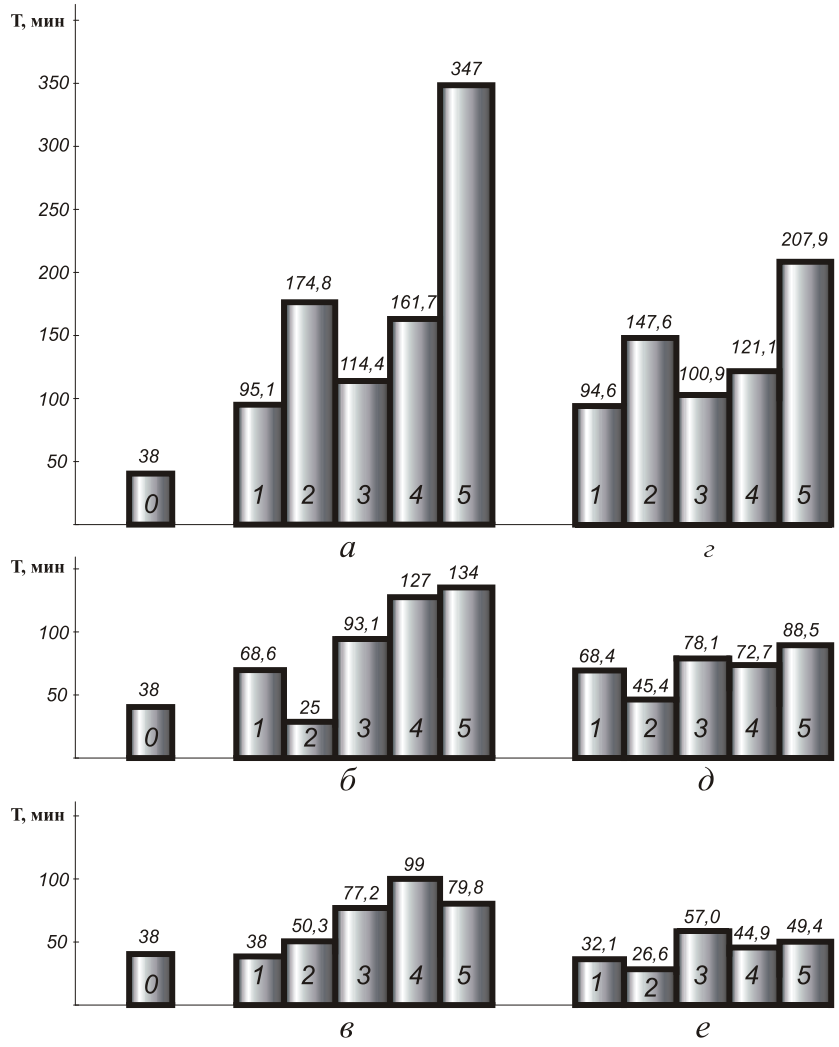


Рисунок – Стойкость не приработанного (0) инструмента и предварительно приработанного с использованием различных СОТС:
1 – сухая обработка; 2 – И-20А; 3 – МР-99; 4 – рапсовое масло; 5 – касторовое масло

Режимы приработки:

а, г – $V_{пр}$ = 28 м/мин (1, 3, 4, 5), $V_{пр}$ = 12 м/мин (2), S_z = 0,1 мм/зуб, t = 0,4 мм;

б, д – $V_{пр}$ = 28 м/мин, S_z = 0,15 мм/зуб, t = 0,5 мм;

в, е – $V_{пр}$=28 м/мин, S_z = 0,2 мм/зуб, t = 0,5 мм;

а, б – V_c = 28 м/мин;

д, е – V_c = 40 м/мин.

Влияние режимов приработки на эффект упрочнения в зависимости от режимов его эксплуатации для различных СОТС приведен в табл.

Таблица

Среда	Режимы приработки					
	$V_{пр}$ = 28 м/мин, (И-20А – 12 м/мин), S_z = 0,1 мм/зуб, t = 0,4 мм		$V_{пр}$ = 28 м/мин, S_z = 0,15 мм/зуб, t = 0,5 мм		$V_{пр}$ = 28 м/мин, S_z = 0,2 мм/зуб, t = 0,5 мм	
	Эксплуатационные режимы*					
	V_c = 28 м/мин	V_c = 40 м/мин	V_c = 28 м/мин	V_c = 40 м/мин	V_c = 28 м/мин	V_c = 40 м/мин
Всухую	2,5	2,5	1,8	1,78	1,1	Снижение -1,1
И-20А	4,6	3,8	1,7	1,2	1,3	Снижение -1,4
МР-99	3,0	2,7	2,5	2,1	2,0	1,3
Рапсовое масло	4,3	3,2	3,4	2,4	2,6	1,2
Касторовое масло	7,8	5,4	3,8	2,3	2,1	1,1

* – S_z = 0,2 мм/зуб, t = 0,5 мм.

Эффект упрочнения определяется как отношение предварительно приработанного инструмента эксплуатируемого на рассматриваемых режимах резания к стойкости не приработанного инструмента при обработке всухую на нормативных режимах резания.

Анализ приведённых в таблицах данных показывает, что эффект упрочнения снижается при ужесточении режимов упрочняющей приработки

инструмента и в зависимости от режима его эксплуатации (в рассматриваемом случае от скорости резания).

При этом степень изменения эффекта упрочнения от скорости резания определяется используемой средой предварительной приработки и скоростью резания при его дальнейшей работе. Это позволяет для определенных режимов работы приработанным инструментом выбирать наиболее эффективную СОТС для обработки и назначать режимы приработки с учетом эффекта упрочнения и возможности повышения режимов его дальнейшей эксплуатации.

Выводы. Проведенные исследования показывают, что стойкость предварительно приработанного инструмента с использованием той или иной СОТС определяется режимами приработки и режимами дальнейшей его работы, т.е. эффект упрочнения инструмента зависит как от режимов приработки, так и от режима его эксплуатации после упрочнения. Это позволяет назначать как более жесткие режимы приработки, так и увеличивать режимы резания при дальнейшей эксплуатации инструмента.

Установлено, что при одних и тех же режимах предварительный приработки инструмента и одни и тех же эксплуатационных режимах при использовании рапсового и касторового масел эффект упрочнения при различных эксплуатационных скоростях резания в 1,5 ÷ 2,0 раза больше в сравнении с остальными используемыми в исследованиях средами.

Список использованных источников: **1.** *Ким В.А.* Влияние приработки рабочих поверхностей быстрорежущего инструмента на его стойкость: Дисс… канд. техн. наук: 05.03.01. – Ташкент – Киев, 1983, – 183 С. **2.** *Каримов Ш.А.* Повышение износостойкости инструмента на основе интенсификации упрочнения его рабочих поверхностей в процессе резания: Дис…, канд. техн. наук: 05.03.01 – Ташкент-Киев, 1987, – 145 С. **3.** *Верещака А.С.* Резание материалов: учебник / *А.С. Верещака, В.С. Кушнер* – М.: Высшая школа, 2009, – 539 С. **4.** *Якубов Ф.Я.* Структурно-энергетические аспекты упрочнения и повышения стойкости режущего инструмента / *Ф.Я. Якубов, В.А. Ким*. – Симферополь, 2005, – 300 С. **5.** *Якубов Ч.Ф.* Упрочняющее действие СОТС при обработке металлов резанием. / Ч.Ф. Якубов. – Симферополь: АОО Симферопольская городская типография (СГТ), 2008 – 156 С. **6.** *Абдулгазис Д.У.* К вопросу об использовании масел растительного происхождения качестве смазочно-охлаждающих технологических средств при обработке металлов резанием / Д.У. Абдулгазис, И.Э. Аметов, Э.Р. Ваниев // Ученые записки Крымского гос. инж – пед. университета, вып.3, Симферополь: Доля, 2002 – С 26-29. **7.** *Алиев А.И.* Повышение работоспособности сложно-профильного режущего инструмента за счет применения технологических сред растительного происхождения: Дисс… канд. техн. наук: 05.03.01 / *Алиев А.И.* – Харьков, 2011, –145 С. **8.** *Ваниев Э.Р.* Влияние режимов резания на стойкость инструмента при фрезеровании стали 12Х18Н10Т в присутствии различных СОТС // Резание и инструмент в технологических системах, – Харьков: НТУ «ХПИ», 2013, – вып.83. – С 32-41. **9.** *Якубов Ч.Ф.* Моделирование стойкости фрезы из Р6М5 при изменении условий её предварительной приработки и дальнейшей эксплуатации при фрезеровании стали 12Х18Н10Т / *Ч.Ф. Якубов, Э.Р. Ваниев* // Вісник національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні – Львів, Вид – во Львівської політехнік, №746 – 2012, – С 207-210.

Bibliography (transliterated): 1. *Kim V.A.* Vlijanie prirabotki rabochih poverhnostej bystrorezhushhego instrumenta na ego stojkost': Diss… kand. tehn. nauk: 05.03.01. – Tashkent – Kiev, 1983, – 183 S. **2.** *Karimov Sh.A.* Povyshenie iznosostojkosti instrumenta na osnove intensifikacii uprochnenija ego rabochih poverhnostej v processe rezanija: Dis…, kand. tehn. nauk: 05.03.01 – Tashkent-Kiev, 1987, – 145 S. **3.** *Vereshhaka A.S.* Rezanie materialov: uchebnik / *A.S. Vereshhaka, V.S. Kushner* – M.: Vysshaja shkola, 2009, – 539 S. **4.** *Jakubov F.Ja.* Strukturno-jenergeticheskie aspekty uprochnenija i povyshenija stojkosti rezhushhego instrumenta / *F.Ja. Jakubov, V.A. Kim.* – Simferopol', 2005, – 300 S. **5.** *Jakubov Ch.F.* Uprochnjajushhee dejstvie SOTS pri obrabotke metallov rezaniem. / *Ch.F. Jakubov.* – Simferopol': AOO Simferopol'skaja gorodskaja tipografija (SGT), 2008 – 156 S. **6.** *Abdulgazis D.U.* K voprosu ob ispol'zovanii masel rastitel'nogo proishozhdenija kachestve smazochno-ohlazhdajushhih tehnologicheskih sredstv pri obrabotke metallov rezaniem / *D.U. Abdulgazis, I.Je. Ametov, Je.R. Vaniev* // Uchenye zapiski Krymskogo gos. inzh – ped. universiteta, vyp.3, Simferopol': Dolja, 2002 – S 26-29. **7.** *Aliev A.I.* Povyshenie rabotosposobnosti slozhno-profil'nogo rezhushhego instrumenta za schet primenenija tehnologicheskih sred rastitel'nogo proishozhdenija: Diss… kand. tehn. nauk: 05.03.01 / *Aliev A.I.* – Har'kov, 2011, –145 S. **8.** *Vaniev Je.R.* Vlijanie rezhimov rezanija na stojkost' instrumenta pri frezerovanii stali 12H18N10T v prisutstvii razlichnyh SOTS // Rezanie i instrument v tehnologicheskih sistemah, – Har'kov: NTU «HPI», 2013, – vyp.83. – S 32-41. **9.** Jakubov Ch.F. Modelirovanie stojkosti frezy iz R6M5 pri izmenenii uslovij ejo predvaritel'noj prirabotki i dal'nejshej jekspluatacii pri frezerovanii stali 12H18N10T / Ch.F. Jakubov, Je.R. Vaniev // Visnik nacional'nogo universitetu «L'vivs'ka politehnika». Optimizacija virobnichih procesiv i tehnichnij kontrol' u mashinobuduvanni ta priladobuduvanni – L'viv, Vid – vo L'vivs'koï politehnik, №746 – 2012, – S 207-210.

УДК: 621.9.08:62.187.4

В.О. ЗАЛОГА, д-р техн. наук,
Т.В. ЯШИНА, Суми,
О.Д. ДИННИК, канд. техн. наук, Конотоп, Україна

УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ МАШИНОБУДІВНОГО ПІДПРИЄМСТВА НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

У статті розглянута проблема підвищення якості та конкурентоспроможності машинобудівної продукції. Проаналізовано фактори, які впливають на достовірність прийнятих рішень щодо якості виготовленої продукції. Запропоновано удосконалення системи оцінювання виробничих процесів на основі використання статистичних методів управління, одним з яких є аналіз вимірювальної системи.
Ключові слова: підвищення якості машинобудівної продукції, статистичні методи

В статье рассмотрена проблема повышения качества и конкурентоспособности машиностроительной продукции. Проанализированы факторы, влияющие на достоверность принятых решений по качеству полученной продукции. Предложено усовершенствование системы оценки производственных процессов на основе использования статистических методов управления, одним из которых является анализ измерительной системы.
Ключевые слова: повышение качества продукции машиностроения, статистические методы

In the article the problem of improving the quality and competitiveness of engineering products is reviewed. Factors that affect the reliability of decisions regarding the quality of the resulting product are analyzed. An improvement of the assessment system of manufacturing processes by using statistical control methods, one of which is Measurement System Analysis, is proposed.
Keywords: improving the quality of engineering products, statistical control methods

Управління діяльністю підприємства з метою підвищення якості та конкурентоспроможності продукції є важливою і актуальною задачею вітчизняних машинобудівних підприємств (МП). Процес виробництва машинобудівної продукції є, як правило, складним, що часто в реальній ситуації ускладнює управління її якістю, тобто визначення точної причини виникнення браку та його усунення шляхом удосконалення діючих технологічних процесів виготовлення як окремих деталей, так і технологічних процесів складання машини, оснащення тощо в цілому. Тому сьогодні актуальним є вдосконалення систем управління якістю (СУЯ) у відповідності до рекомендацій стандартів ISO серії 9000 та ISO/TS 16949 [1-3], а також створення умов, які дозволяють на будь-якому етапі виробничого процесу отримати достовірну інформацію про якість продукції, що виготовляється, і, в разі виявлення невідповідностей, встановлювати причини їх виникнення та розробляти заходи щодо їхньої ліквідації. Одним із ефективних шляхів вдосконалення СУЯ є усунення проблем у вимірювальних системах, що діють на кожному машинобудівному підприємстві.

© В.О. Залога, Т.В. Яшина, О.Д. Динник, 2016

В ході вивчення ряду інформаційних джерел [4-5 та ін.] з'ясовано, що на сьогоднішній день дуже важливим є аналіз вимірювальної системи (ВС), діючої на даному підприємстві, з метою встановлення ступеня її впливу на управління якістю продукції МП та визначення тих проблем, що супроводжують процеси вимірювання. Аналіз літературних джерел з цього напряму управління якістю показав що цілий ряд питань, пов'язаних з удосконаленням ВС, є невідкладними і з метою підвищення достовірності результатів вимірювань та зниження їх невизначеності мають бути вирішені, що є актуальним та важливим завданням СУЯ продукції МП. Тому метою даної роботи є: розробка рекомендації щодо підвищення якості виготовлення машинобудівної продукції відповідно до вимог міжнародних стандартів ISO серії 9000 та ISO/TS 16949 та розробка шляхів удосконалення системи оцінювання виробничих процесів з використанням статистичних методів управління.

Встановлено [6-7], що в сучасних умовах результати вимірювань використовуються на виробництві не лише тільки для визначення розмірів виробів, а й прийняття відповідних управлінських рішень щодо регулювання виробничого процесу, яке може ґрунтуватися або на порівнянні результатів вимірювань, або на статистичних даних, що базуються на них, зі статистичними контрольними границями досліджуваного процесу. Тобто, у любому випадку ефект від використання процедур з використанням результатів вимірювань, у визначальній мірі залежить від їх точності та достовірності. Таким чином, для того, щоб застосування результатів вимірювань з метою удосконалення СУЯ приносило користь і виправдовувало витрати, пов'язані з їх отриманням та обробкою, потрібно в першу чергу сконцентрувати увагу на якості та достовірності отримуваних даних, тобто розібратися як з технічними можливостями вимірювальних інструментів, приладів, засобів тощо, так і ВС в цілому, прийнятих на підприємстві.

В ході виконаних авторами досліджень з'ясовано, що на достовірність результатів вимірювань впливає велика кількість факторів, які є складовими ВС і до яких належать: невідповідність зразків вимірювань; індивідуальні особливості операторів; недосконаліть і невідповідність сучасним вимогам методів вимірювань; невідповідність вимогам креслень засобів вимірювань; невідповідність вимогам навколишнього середовища; недостатня кваліфікація користувачів вимірювальних засобів тощо. Вказані фактори в роботі були проаналізовані за допомогою причинно-наслідкової діаграми К. Ісікави (рис. 1).

Таким чином видно, що єдина ВС підприємства охоплює: засоби і методи вимірювання, операторів, навколишнє середовище, еталони, вимірювальні зразки, матеріал. Це обумовлює необхідність зміщення уваги фахівців при оцінці достовірності вимірювань з аналізу тільки засобів

вимірювання до оцінки якості ВС та її статистичних характеристик, а саме: стабільності, зміщення, лінійності, збіжності та відтворюваності.

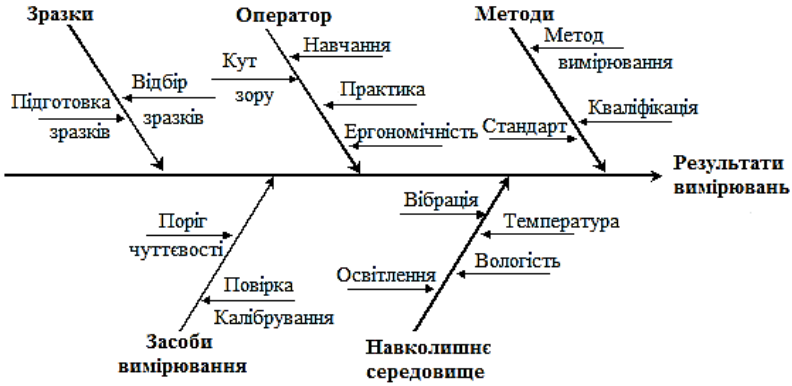


Рисунок 1 – Причинно-наслідкова діаграма К. Ісікави

Отже, основними вимогами до методу оцінки ВС є: можливість оцінювати достовірність результатів вимірювань; мінливість розсіювання, зміщення та стабільність показників процесів.

Аналіз ВС доцільно проводити для отримання відповідей на питання наступних типів: чи здатна досліджувана система адекватно знаходити відмінності між деталями; чи стабільна вона протягом певного часу; чи точна система в усьому діапазоні зміни розмірів деталей.

Однією з основних цілей проведеного дослідження ВС є отримання інформації щодо величин і типів мінливості у вимірюваннях, викликаних системою при її взаємодії з навколишнім середовищем. Ця інформація може бути надзвичайно важливою, оскільки для виробничого процесу часто більш визначальним є врахування, наприклад, збіжності і зміщення при калібруванні і встановлення для них «розумних» (тільки край потрібних) меж, ніж використання надто точних приладів з дуже високою збіжністю.

Відомо [7], що сьогодні одним із дієвих інструментів статистичного аналізу у виробничій практиці, необхідних для контролю якості продукції МП на всіх етапах її виготовлення, є аналіз ВС (MSA – Measurement System Analysis). MSA є набором експериментів і статистичних методів, адаптованих для отримання оцінок прийнятності результатів вимірювань, покликаний дати висновок щодо прийнятності використовуваної вимірювальної системи (ВС) через кількісне вираження її характеристик.

Основними задачами MSA є:

– оцінювання параметрів статистичних характеристик виробничого процесу (ВП) на стадії підготовки виробництва;

– періодичного підтвердження статистичних характеристик ВП;

– позачергового підтвердження статистичних характеристик ВП у випадках заміни, модернізації, ремонту засобів вимірювань, зміни технологічного процесу, збільшення кількості невідповідностей вимірюваного параметра тощо.

MSA починається з розуміння мети і процесу вимірювання. В ході аналізу всі джерела хаотичних і явно неприпустимих помилок повинні бути усунені. Дослідження вимірювань слідує концепціям Демінга [8]: «Визначте значні джерела помилок і усуньте їх; дозвольте одному або декільком факторам змінюватися; вимірюйте кілька разів; аналізуйте результати дій.».

В процесі дослідження були визначені і класифіковані характеристики, за якими оцінюється ВС, а саме: достовірність результатів вимірювань, мінливість розкиду та настройки системи. Треба мати на увазі, що при цьому, повинна існувати можливість оцінки як короткострокової мінливості ВС, так і довгострокової, тобто практичної придатності ВС.

ВС запропоновано вважати придатною, якщо виконуються наступні умови:

– процес вимірювань знаходиться в статистично керованому стані (тобто він стабільний і незмінний або присутні тільки звичайні причини мінливості);

– процес налаштований на ціль (тобто немає зміщення);

– мінливість процесу (збіжність і відтворюваність) прийнятною для даного підприємства і знаходиться в очікуваних межах.

Процес може вважатися нестабільним, якщо виконується хоча б одна з таких умов: одна або кілька точок знаходяться за межами контрольних меж; присутні серії точок – сім точок поспіль знаходяться по одну сторону від середнього значення або сім точок поспіль зростають або зменшуються; процес проявляє інші ознаки невипадкової поведінки (наприклад, більшість точок групується біля лінії середнього, або близько лінії контрольних меж).

У разі нестабільності процесу, MSA дозволяє виявити джерела порушення стабільності та запропонувати можливі корегувальні дії для їх усунення.

Якщо жодна з перерахованих умов не порушується, можна зробити висновок, що система стабільна і можна проводити дії щодо поліпшення виробничого процесу, адже удосконалювати можна лише стабільний процес.

Отже, у випадку якщо вимірювальний процес стабільний, то у ВС не повинно бути зміщення та лінійності, а вклад ВС в розкид вимірювального показника $\leq$ 30 %. Якщо будь-яка із наведених характеристик визнається неприйнятною, необхідно проводити аналіз причин мінливості результатів вимірювань [9].

Аналіз ВС оцінює здатність досліджуваної системи забезпечувати адекватність даних вимірювань для ефективного моніторингу процесу. Таким чином, при використанні вимірювального процесу необхідно виконати такі умови:

– забезпечити адекватну роздільну здатність і чутливість засобу вимірювання;

– вимірювальний процес повинен бути в статистично керованому стані;

– для контролю продукції, мінливість вимірювального процесу повинна бути мала в порівнянні з межами допуску;

– для управління виробничим процесом, мінливість вимірювального процесу повинна бути меншою за мінливість виробничого процесу.

Результати проведеного аналізу ВС можуть служити основою для прийняття рішення про результативність використання досліджуваної системи для визначення показників ВП. ВС доцільно використовувати для удосконалення оцінювання якості ВП, якщо її статистичні характеристики відповідають вимогам споживачів та нормам нормативної документації, зокрема, вимогам міжнародних стандартів ISO серії 9000 та ISO/TS 16949.

Таким чином, в результаті проведених досліджень можна зробити висновок, що дані, отримані в ході аналізу ВС машинобудівного підприємства, повинні використовуватися не тільки для перевірки відповідності характеристик продукції встановленим вимогам, а, перш за все, для прийняття управлінських рішень щодо необхідності вдосконалення виробничих процесів. Можливість використання ВС в складі більш складних виробничих структур і умовність границь між власне вимірювальними завданнями і завданнями управління виробництвом робить актуальною проблему встановлення зв'язку між точністю вимірювань і характеристиками якості вирішення цих завдань.

Список використаних джерел: **1.** ISO/TS 16949:2009 «Quality management system. Particular requirements for the application of ISO 9001:2000 for automotive production and relevant service part organizations», third edition, 2009-06-15. **2.** Системи управління якістю. Вимоги : ДСТУ ISO 9001:2009. – [Чинний від 22.06.2009]. – К.: Держспоживстандарт України. – 37 с. – (Національний стандарт України). **3.** Системи управління якістю. Основні положення та словник. Настанови щодо поліпшення діяльності: ДСТУ ISO 9000:2007. – [Чинний від 03.09.2007]. – К. Держспоживстандарт України. – 27 с. – (Національний стандарт України). **4.** *Ткачук Л. М.* Сучасні тенденції управління якістю на підприємствах України / *Л. М. Ткачук* // Вісник Київського національного університету ім. Т. Г. Шевченка. Серія "Економіка". – 2003. – Вип. 65. – С. 101–102. **5.** *Павловская И. В.* Управление качеством продукции и процессов с использованием ранжирующих измерительных систем / *И. В. Павловская*// Вестник БГТУ. – 2012. Вып.3. С. 130 – 134 **6.** *Плехова Ю. О.* Экономико-организационные особенности выявления и использования резервов снижения брака продукции в машиностроении / *Ю. О. Плехова* // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2007. – № 5. – С. 140–145. **7.** Анализ измерительных систем. Справочное руководство: - 3-е изд., перераб. и доп. – Н. Новгород: СМЦ Приоритет. – 2003. – 230 с. **8.** *Деминг У. Э.* Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами/ *У.Э. Деминг*. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2007.**9.** *Миттаг Х.-Й.* Статистические методы обеспечения качества / *Х.-Й. Миттаг, Х. Ринне* –

М.: Машиностроение. – 1995. – 601 с. **10.** *Строителев В. П.* Статистические методы в управлении качеством */ В. П. Строителев*. – М. : Европейский центр по качеству, 2002. – 164 с.

Bibliography (transliterated): 1. ISO/TS 16949:2009 «Quality management system. Particular requirements for the application of ISO 9001:2000 for automotive production and relevant service part organizations», third edition, 2009-06-15. **2.** Sistemi upravlinnja jakistju. Vimogi : DSTU ISO 9001:2009. – [Chinnij vid 22.06.2009]. – K.: Derzhspozhivstandart Ukraïni. – 37 c. – (Nacional'nij standart Ukraïni). **3.** Sistemi upravlinnja jakistju. Osnovni polozhennja ta slovnik. Nastanovi shhodo polipshennja dijal'nosti: DSTU ISO 9000:2007. – [Chinnij vid 03.09.2007]. – K. Derzhspozhivstandart Ukraïni. – 27 c. – (Nacional'nij standart Ukraïni). **4.** *Tkachuk L. M.* Suchasni tendenciï upravlinnja jakistju na pidpricmstvah Ukraïni / L. M. Tkachuk // Visnik Kiïvs'kogo nacional'nogo universitetu im. T. G. Shevchenka. Serija "Ekonomika". – 2003. – Vip. 65. – S. 101–102. **5.** *Pavlovskaja I. V.* Upravlenie kachestvom produkcii i processov s ispol'zovaniem ranzhirujushhih izmeritel'nyh sistem / *I. V. Pavlovskaja//* Vestnik BGTU. – 2012. Vyp.3. S. 130 – 134. **6.** *Plehova Ju. O.* Jekonomiko-organizacionnye osobennosti vyjavlenija i ispol'zovanija rezervov snizhenija braka produkcii v mashinostroenii / *Ju. O. Plehova* // Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo. – 2007. – № 5. – S. 140–145. **7.** Analiz izmeritel'nyh sistem. Spravochnoe rukovodstvo: - 3-e izd., pererab. i dop. – N. Novgorod: SMC Prioritet. – 2003. – 230 s. **8.** *Deming U. Je*. Vyhod iz krizisa: Novaja paradigma upravlenija ljud'mi, sistemami i processami/ *U.Je. Deming*. – M.: Al'pina Biznes Buks, 2007. **9.** *Mittag H.-J.* Statisticheskie metody obespechenija kachestva / *H.-J. Mittag, H. Rinne* – M.: Mashinostroenie. – 1995. – 601 s. 10. *Stroitelev V. P.* Statisticheskie metody v upravlenii kachestvom / *V. P. Stroitelev*. – M. : Evropejskij centr po kachestvu, 2002. – 164 s.

УДК 378.147

Е. В. НАБОКА, канд. техн. наук,
М.Э.КОЛЕСНИК, канд. техн. наук, Харьков, Украина

ПРИМЕНЕНИЕ МЕЖДУНАРОДНЫХ СТАНДАРТОВ НА ЭТАПЕ ИНТЕГРАЦИИ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВА С ПРОЦЕССОМ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

У роботі проведено аналіз стандартів ISO та надано рекомендації щодо застосування при будь-яких видах машинобудівного виробництва, а так само в різних організаціях незалежно від виду діяльності, розміру організації і продукції, що поставляється (послуг). Виявлено взаємозв'язок між основними стандартами якості продукції. Запропоновано вимоги, які можуть застосовуватися для розробки системи якості виготовлення продукції.
Ключові слова: стандарт, сертифікация, якість, управління, виробництво

В работе проведен анализ стандартов ISO и даны рекомендации по применению при любых видах машиностроительного производства, а также в различных организациях независимо от вида деятельности, размера организации и поставляемой продукции (услуг). Выявлена взаимосвязь между основными стандартами качества продукции. Предложены требования, которые могут применяться для разработки системы качества изготовления продукции
Ключевые слова: стандарт, сертификация, качество, управление, производство

The analysis of ISO standards and recommendations for use in all types of machine-building production, as well as in a variety of organizations, regardless of the type of activity, size of the organization and supplied products (services). The interrelation between the main standards of product quality. Proposed requirements, which can be used to develop products manufacturing quality system.
Keywords: standard, certification, product quality, management, manufacturing

Введение. Общепризнанно на мировом уровне, что XXI век будет веком качества, так как в условиях глобального рынка уровень качества товаров, услуг и менеджмента становится главным, определяющим фактором конкурентоспособности, а значит, и благополучия любых предприятий, организаций, регионов, стран. В условиях жесткой конкурентной борьбы на рынке отечественных и зарубежных организаций, выжить могут лишь компании, обладающие главным конкурентным преимуществом – высоким качеством менеджмента. Мировая практика показала, что применение международных стандартов ISO серии 9000 на сегодняшний день является надежным инструментом для построения эффективной системы управления, повышения конкурентоспособности и создания благоприятных условий для роста инвестиций. Международные стандарты распространяются сегодня на все сферы деятельности: промышленность и инновации, финансовые и иные услуги, социальную сферу, сферу управления, включая государственное и

© Е. В. Набока, М.Э.Колесник, 2016

муниципальное управление. Т.е. стандартизация является важнейшим инструментом конкурентоспособности продукции.

Цель статьи. Внедрение международных стандартов в машиностроительное производство.

Постановка задачи. Стандартизация – это научно-техническая деятельность, направленная на достижение оптимальной степени упорядочения в определенной области посредством установления требований для всеобщего и многократного применения в отношении реально существующих или потенциальных задач.

Стандартизация решает поставленные перед ней задачи путем разработки, внедрения стандартов и других нормативных документов по стандартизации и проведения государственного надзора за ними.

Главной целевой установкой международных стандартов является: построение систем качества, обеспечивающих изготовление продукции, соответствующей требованиям заказчиков и соответственно ориентированных на предоставление доказательств заказчику способности предприятия стабильно выпускать продукцию определенного уровня качества.

Стандарты серии ISO 9000 определяют задачи систем качества, которые необходимо выполнить, однако они не описывают способа их достижения и предоставляют такой выбор руководству предприятия. В стандартах дается различие между требованиями к системе качества и требованиями к продукции. На основе этого стандарты ISO применяются к организациям, обеспечивающим продукцией, относящейся ко всем общим категориям продукции (оборудование, программное обеспечение, перерабатываемые материалы, услуги), и ко всем характеристикам качества продукции

Проблема роста безопасности и качества продукции предприятий и услуг может быть решена на основе всеобщей стандартизации и сертификации в соответствии с требованиями стандарта ISO 9001:2008. Как показала практика стран, входящих во Всемирную торговую организацию (ВТО), чем больше предприятий сертифицировано по ISO 9001:2008, тем выше конкурентоспособность и качество товаров и услуг в стране, тем меньше нужно применять меры для защиты рынков товаров и услуг. Сегодня в Украине сотни, а в Европе уже сотни тысяч предприятий внедрили и сертифицировали Систему менеджмента качества (СМК) на базе ISO 9001, и с каждым годом их число неуклонно растет.

Материалы исследований. Стандарты серии ISO 9000 – это пакет документов по обеспечению качества подготовленный членами международной делегации, известной как " ISO /Технический Комитет 176" (ISO/TC 176). В настоящее время серия ISO 9000 включает (см. рис. 1):

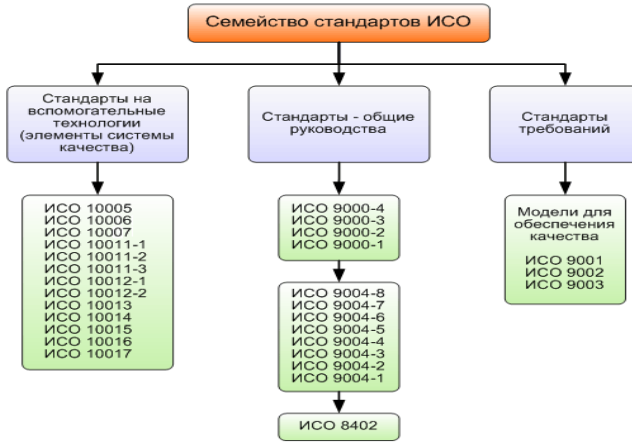


Рисунок 1 – Схема семейства стандартов качества ISO

Из стандартов серии ИСО 9000 три стандарта ISO 9001, ISO 9002 и ISO 9003 являются основополагающими документами системы качества, описывающими модели обеспечения качества: ISO 9001 "Система Качества: Модель обеспечения качества при проектировании, разработке, производстве, монтаже и обслуживании"; ISO 9002 "Система Качества: Модель обеспечения качества при производстве, монтаже и обслуживании"; ISO 9003 "Система Качества: Модель обеспечения качества при окончательном контроле и испытаниях".

Анализ области применения и содержания стандартов позволяет выявить их взаимосвязь (см. рис. 2).

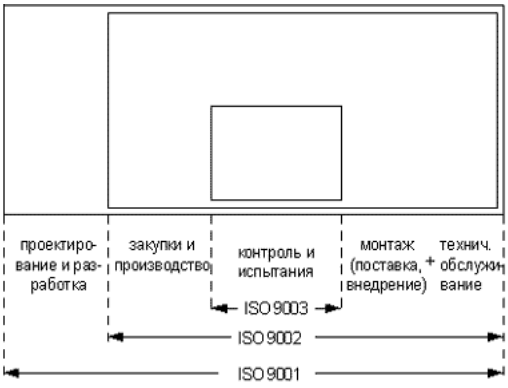


Рисунок 2 – Взаимосвязь между ISO 9001, 9002, 9003

Систему качества изготовления продукции необходимо разрабатывать с учетом выполнения требований стандарта ISO 9001, т.к. они универсальны и подходят для любого вида производства, в то время как, требования стандартов ISO 9002, 9003 не в полной мере соответствуют нашему производству.

Стандарт ISO 9001:2008 состоит из следующих разделов:

Раздел 1. Область применения – описывает общие положения стандарта и его применение в организациях. Также определяет те случаи, когда предприятие, разрабатывающее и внедряющее систему качества, может сделать исключение из реализации требований стандарта.

Раздел 2. Нормативные ссылки – даются ссылки на стандарты серии ISO 9000.

Раздел 3. Термины и определения – приводятся термины и определения, используемые в стандарте.

Раздел 4. Система менеджмента качества – определяет общие требования к системе менеджмента качества, управлению документаций и записями по качеству.

Раздел 5. Ответственность руководства – определяет требования к административному управлению построением, внедрением и функционированием системы менеджмента качества. Требования данного раздела предъявляются к высшему руководству организации и к системе административного управления.

Раздел 6. Менеджмент ресурсов – определяет требования к ресурсам, необходимым для разработки, внедрения и функционирования системы качества. К таким ресурсам стандарт относит человеческие ресурсы, материальные ресурсы, инфраструктуру и производственную среду.

Раздел 7. Процессы жизненного цикла – определяет требования к основным и обеспечивающим процессам предприятия. В этом разделе представлены, наиболее объемные требования, которые предъявляются к основной деятельности предприятия по управлению процессами производства продукции или предоставления услуг.

Раздел 8. Измерение, анализ и улучшение – определяет требования к проведению и организации анализа, измерений и улучшений системы менеджмента качества, процессов и выпускаемой продукции (оказываемым услугам).

Результаты исследований. Стандарт ISO 9001:2008 (в Украине ДСТУ ISO 9001:2009) предназначен для разработки и внедрения систем менеджмента качества предприятий с целью последующей сертификации или для заключения контрактов с другими предприятиями, которые предъявляют требования к стабильности и надежности выполнения контрактных обязательств.

Требования, содержащиеся в стандарте ISO 9001:2008 являются общими и предназначены для применения ко всем организациям независимо от вида деятельности, размера организации и поставляемой продукции (услуг). Стандарт определят, что необходимо делать для внедрения системы качества, но не определяет, как это делать. Именно за счет такого подхода требования стандарта являются универсальными и применимыми к любой организации. Методы, как реализовать то или иное требование стандарта предприятие выбирает само, исходя из своих потребностей и возможностей.

Выводы. Анализ содержания и применения международных стандартов позволяет выявить взаимосвязи между тремя стандартами: ISO 9001, ISO 9002, ISO 9003. В результате чего было установлено, что требования стандарта ISO 9001 универсальны, подходят для любого типа производства и могут применяется на этапе интеграции процесса управления качества с процессом конструкторско-технологической подготовки производства.

Список литературы: 1. *Ребрин Ю.И.* Управление качеством: учебное пособие / *Ю.И. Ребрин*. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 174с. **2.** *Васильев А.С.* Технологические основы управления качеством машин / *А.С. Васильев, А.М. Дальский, С.А. Клименко, Л.Г. Полонский, М.Л. Хейфец, П. И. Ящерицын.* – М.: Машиностроение, 2003. – 256 с. **3.** Управление качеством: учебник по специальности «Менеджмент организации» / *Т. А. Салимова*. – М.: Издательство «Омега-Л», 2007. – 414 с. **4.** Управление качеством: учебник / *Д.А. Шевчук*. – М.: ГроссМедиа, РОСБУХ, 2008. – 216с. **5.** ДСТУ ISO 9001:2009 (официальный перевод ISO 9001:2008).

Bibliography (transliterated): 1. *Rebrin Ju.I.* Upravlenie kachestvom: uchebnoe posobie / *Ju.I. Rebrin*. – Taganrog: Izd-vo TRTU, 2004. – 174s. **2**. *Vasil'ev A.S.* Tehnologicheskie osnovy upravlenija kachestvom mashin / *A.S. Vasil'ev, A.M. Dal'skij, S.A. Klimenko, L.G. Polonskij, M.L. Hejfec, P. I. Jashhericyn.* – M.: Mashinostroenie, 2003. – 256 s**. 3**. Upravlenie kachestvom: uchebnik po special'nosti «Menedzhment organizacii» / *T. A. Salimova*. – M.: Izdatel'stvo «Omega-L», 2007. – 414 s. **4.** Upravlenie kachestvom: uchebnik / *D.A. Shevchuk.* – M.: GrossMedia, ROSBUH, 2008. – 216s**. 5**. DSTU ISO 9001:2009 (oficial'nyj perevod ISO 9001:2008)

УДК 621.941

А.А. ОРГИЯН, д-р тех. наук.,
И.М. ТВОРИЩУК,
А.В. БАЛАНЮК, Одесса, Украина

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ПОДРЕЗКИ СПЛОШНЫХ И ПРЕРЫВИСТЫХ ТОРЦОВ

У статті вивчена віброустійчивість процесу тонкого точіння при підрізуванні торців з переривчастою і суцільною поверхнями. Розроблено методику розрахунку граничної ширини зрізу різцем - лопатою при зміні жорсткості підсистеми деталь - пристосування, подачі, а також зміни матеріалу заготовок. Виконано зіставлення розрахункових і експериментальних результатів. Вивчено параметричну стійкість системи при підрізуванні переривчастих торців. Побудовано області параметричної стійкості, а також осцилограми коливань.
Ключові слова: віброустійчивість, процес тонкого точіння, стійкість системи

В статье изучена виброустойчивость процесса тонкого точения при подрезке торцов с прерывистой и сплошной поверхностями. Разработана методика расчета предельной ширины среза резцом - лопатой при изменении жесткости подсистемы деталь - приспособление, подачи, а также изменения материала заготовок. Выполнено сопоставление расчетных и экспериментальных результатов. Изучена параметрическая устойчивость системы при подрезке прерывистых торцов. Построены области параметрической устойчивости, а также осциллограммы колебаний.
Ключевые слова: виброустойчивость, процесс тонкого точения, устойчивость системы

The paper studied the process of fine turning vibration when facing intermittent and continuous surfaces. The method of calculating the width of the marginal cut-off cutter - a shovel when the rigidity changing part subsystem - device, feeding and changing pieces of material. The comparison of the calculated and experimental results. Studied the stability of parametric system for trimming broken ends. Constructed area of parametric stability and oscillation waveform.
Keywords: vibration, fine turning, stability of parametric system

Технология совмещения операций на отделочно-расточных станках (ОРС) предусматривает два принципиально различных метода выполнения операции подрезки торцов: метод радиальной подачи и метод осевой подачи. Более производительным и простым является метод осевой подачи (подрезка широко лезвийным резцом-ножом), возможности которого еще изучены недостаточно. В исследовании менялись материалы образцов: (сталь, чугун, бронза и алюминий); диаметры подрезаемых торцов от 60 до 150 *мм*, а также их ширина до 10 *мм*. Режим резания при обработке стали $V = 50 \div 100\, м/мин$; для чугуна $V = 80 - 200\ м/мин,$ при обработке бронзы $V = 120 \div 270\, м/мин$ Подача изменялась в пределах $S = 0,02 - 0,03 мм/об.$ Количество прерываний за оборот: 2, 4, 10. Значение максимально допустимой ширины торца при резании существенно зависит от жесткости

© А.А. Оргиян, И.М. Творищук, А.В. Баланюк, 2016

приспособления, в котором закреплена деталь (инструмент), а также от количества прерываний [1,2].

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Борштанга 2, несущая широкий подрезной резец 1, была установлена на шпиндельной головке 3. Обрабатываемая деталь 4, торец которой меньше ширины режущего лезвия, крепилась в приспособлении 5, расположенном на подвижном столе станка.

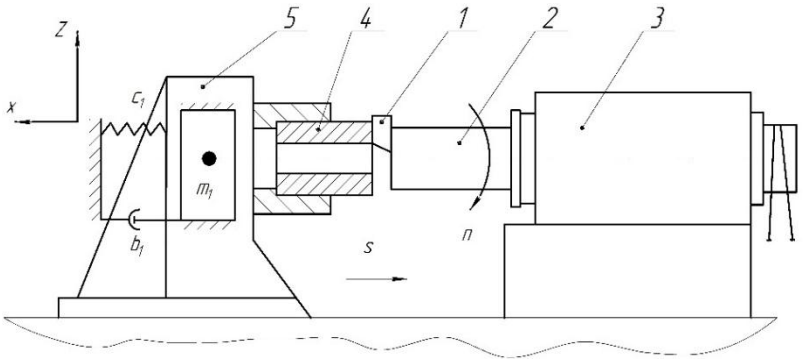


Рисунок 1 – Схема эксперимента

Колебания возникающие в процессе резания, ориентируются в основном по нормали к обрабатываемой поверхности и определяются координатой *X,* по которой действует сила резания P_x.

Колебания развиваются в 2-х подсистемах: I – ″деталь-приспособление″; II – ″шпиндель-борштанга″. Частота собственных колебаний шпиндельного узла в направлении его оси приблизительно равна 350 - 400 *Гц*, а жесткость изменяется (в зависимости от типоразмера шпиндельной головки) в пределах 200 – 600 *н/мкм*. В приведенных экспериментах жесткость приспособлений изменялась от 60 до 130 *н/мкм*, а частота свободных колебаний составляла от 100 до 200 *Гц*. Затухание колебаний, характеризуемое логарифмическим декрементом, в обеих подсистемах составляло примерно 0,1.

Известно [3], что виброустойчивость зависит от параметров обеих подсистем, если близки их собственные частоты колебаний. При существенном различии частот виброустойчивость снижается, в основном, вследствие колебаний лишь той подсистемы, которая обладает более низкой собственной частотой и малой жесткостью. Сравнивая динамические параметры обеих подсистем, можно заключить, что в расчетной модели можно учитывать лишь колебания подсистемы ″деталь - приспособление″.

Следуя В. А. Кудинову [3] при проведении динамического расчета, направленного на определение виброустойчивости и нахождение

зависимостей между параметрами упругой системы и процесса резания, рассматриваем одноконтурную систему, состоящую из двух элементов: эквивалентной упругой системы и процесса резания.

Для разработки обоснованной расчетной схемы эквивалентной упругой системы следует изучить статические и динамические характеристики, а также формы колебаний при резании. В случае выполнения тонкого растачивания колебания в упругой системе ОРС при потере устойчивости обусловлены малой жесткостью подсистемы шпиндельный узел-борштанга и соответствуют изгибной форме колебаний. При проведении подрезки торцов, хотя жесткость борштанги имеет примерно те же значения, форма возникающих колебаний существенно изменяется. Величина и направление действия сил резания при подрезании торца иные, чем при растачивании: сила резания увеличивается, особенно сильно возрастает компонента P_x. Увеличиваются не только статические отжимы в системе, возрастают при тех же условиях и динамические перемещения. Возникновение колебаний в значительной мере определяется жесткостью подсистемы деталь – приспособление [4, 6].

Составляющие силы резания при подрезке свободного торца направлены: P_x – по оси вращения (направление подачи) и P_z – по касательной к окружности, лежащей в плоскости резания. В условиях действия таких сил могут возникать колебания упругих подсистем по координате x и крутильные колебания. В данной работе рассматриваем лишь колебания по координате x, которые определяют чистоту обработанной поверхности и выполнимость операции подрезки торцов.

Уравнения движения упругой системы имеет вид $m\ddot{x} + h\dot{x} + cx = P_x$.

Параметры, характеризующие эту систему должны соответствовать параметрам подсистемы деталь-приспособление при колебаниях по низшей форме в направлении оси X (m - приведенная масса подсистемы ″деталь-приспособление″, b - коэффициент демпфирования, C - жесткость системы ″деталь-приспособление″).

Процесс резания в расчетах виброустойчивости описываем динамической характеристикой, полученной В.А. Кудиновым [3]. Характеристика устанавливает связь между вибрационными перемещениями и соответствующими им изменениями силы резания. Динамическая характеристика отражает инерционные свойства процесса, проявляющиеся в фазовых сдвигах (отставании) силы P_z от перемещения.

Простейшая форма динамической характеристики в операторной форме записывается в виде:

$$P_z = \frac{K_p}{T_p \cdot p + 1} \cdot Y$$

где: K_p - -коэффициент резания, равный $K_p = 1{,}5 \cdot \sigma_в \cdot \xi_o \cdot b$; $\sigma_в$ - временное сопротивление обрабатываемого материала; ξ_o -усадка стружи; b - ширина среза; T_p - постоянная времени стружкообразования ($T_p = 1{,}5 \cdot \frac{a_0 \cdot \xi_0}{V}$); a_0-толщина среза; V -скорость резания.

Замкнутая система описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} T_1^2 \cdot \ddot{x} + T_2 \cdot \dot{x} + x &= k \cdot P_x, \\ T_p \cdot P_z + P_z &= -k_p \cdot x, \end{aligned} \tag{1}$$

где: $T_1^2 = \frac{m}{c}$; $T_2 = \frac{h}{c}$; $k = \frac{1}{c}$.

Учитывая, что приближенно $P_x = \mu \cdot P_z$, где μ - коэффициент трения стружки о переднюю грань, запишем систему в окончательном виде:

$$\begin{aligned} T_1^2 \cdot \ddot{x} + T_2 \cdot \dot{x} + x &= k \cdot \mu \cdot P_z, \\ T_p \cdot \dot{P}_z + P_z &= -k_p \cdot x. \end{aligned} \tag{2}$$

Рассмотрим условия устойчивости системы (2). Характеристическое уравнение системы имеет вид:

$$\begin{vmatrix} T_1^2 p^2 + pT_2 + 1 & -k\mu \\ k_p & T_p p + 1 \end{vmatrix} = 0.$$

Раскрывая определитель, получаем:

$$\left(T_1^2 \cdot p^2 + T_2 \cdot p + 1\right)\left(T_p \cdot p + 1\right) + k_p \cdot k \cdot \mu = 0. \tag{3}$$

Коэффициенты характеристического уравнения по убывающим степеням p равны:

$$p^3 \to a_0 = T_1^2 T_p;$$
$$p^2 \to a_1 = T_1^2 + T_2 T_p;$$
$$p^1 \to a_2 = T_2 + T_p;$$
$$p^0 \to a_3 = 1 + k_p k\mu.$$

Система устойчива, если положительны коэффициенты a_0, a_1, a_2, a_3 и определитель Гурвица, имеющий вид:

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 \\ a_3 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 .$$

Первое условие выполняется всегда. Второе условие ($\Delta \rangle 0$) выполняется при определенных значениях параметров упругой системы и процесса резания. Для анализа устойчивости раскроем значение определителя Гурвица:

$$\Delta = T_1^2 T_2 + T_2^2 T_p + T_2 T_p^2 - T_1^2 T_p k_p k\mu \rangle 0 .$$

Записывая это условие в параметрах процесса резания и переходя к предельному значению ширины среза $b_{пр}$, находим

$$b_{пр} = \frac{T_2\left(T_1^2 + T_2 T_p + T_p^2\right)}{k_p T_1^2 T_p k\mu} . \qquad (4)$$

Полученное выражение позволяет расчетным путем определить для заданного приспособления размеры предельно допустимой ширины обрабатываемого торца. Однако, как указывалось выше, расчет основывается на целом ряде упрощающих допущений. Правомерность принятых допущений может быть проверена при сопоставлении результатов расчета с опытными данными. Примененная методика исследования предусматривает проведение такого рода сопоставления. Эксперимент и соответствующий расчет проводятся с использованием специального приспособления с изменяемыми параметрами.

В расчетах устойчивости приняты: обрабатываемый материал - сталь 45, $\sigma_в = 70$ *кГ / м*^{2}, скорость резания $V = 100$ *м / мин* $= 1{,}67 \cdot 10^3$ *мм / сек*, подача $s = 0{,}02$ *мм / об* (толщина среза $a_0 = 0{,}02$ *мм*), усадка стружки $\xi = 5$. Коэффициент трения стружки о резец $\mu = 0{,}8$.

Коэффициент резания равен:

$$k_p = 1,5 \cdot 70 \cdot 5 \cdot b \approx 525 \cdot b \ кГ / мм^2 .$$

Постоянная стружкообразования равна:

$$T_p = 1,5 \cdot \frac{0,02 \cdot 5}{1,67 \cdot 10^3} = 0,9 \cdot 10^{-4} \ сек .$$

Результаты расчетов устойчивости при изменении жесткости приспособления приведены в табл.

Таблица 1 – Результаты расчетов предельной ширины торцов для разных податливостей системы ″деталь - приспособление″

$k, мм/кг$	$T_1^2, сек^2$	$T_2, сек^2$	$b_{пр}, мм$
$0,1 \cdot 10^{-3}$	$0,633 \cdot 10^{-6}$	$0,43 \cdot 10^{-4}$	11,6
$0,12 \cdot 10^{-3}$	$0,323 \cdot 10^{-6}$	$0,344 \cdot 10^{-4}$	7,8
$0,19 \cdot 10^{-3}$	$0,157 \cdot 10^{-6}$	$0,266 \cdot 10^{-4}$	3,9
$0,24 \cdot 10^{-3}$	$0,125 \cdot 10^{-6}$	$0,258 \cdot 10^{-4}$	3,1
$0,29 \cdot 10^{-3}$	$0,115 \cdot 10^{-6}$	$0,27 \cdot 10^{-4}$	2,7
$0,34 \cdot 10^{-3}$	$0,110 \cdot 10^{-6}$	$0,264 \cdot 10^{-4}$	2,2
$0,40 \cdot 10^{-3}$	$0,115 \cdot 10^{-6}$	$0,292 \cdot 10^{-4}$	2,1
$0,47 \cdot 10^{-3}$	$0,137 \cdot 10^{-6}$	$0,33 \cdot 10^{-4}$	2,0
$0,54 \cdot 10^{-3}$	$0,175 \cdot 10^{-6}$	$0,36 \cdot 10^{-4}$	1,8

Характер зависимости предельной ширины среза $b_{пр}$ при изменении податливости и подачи иллюстрируется графиками (рис. 2).

Ряд важных для практической оценки виброустойчивости закономерностей обнаружен в экспериментах (рис. 3).

При подрезке торцов малого диаметра (около 15 *мм*) с приближением к границе устойчивости развиваются колебания с частотой, близкой к собственной частоте упругой системы f_1, причем уровень эти колебаний в пределах одного оборота почти не изменяется, а следы вибраций равномерно распределяются по обработанной поверхности. При обработке в тех же условиях торцов диаметром 40 *мм* и более наблюдаются колебания переменного уровня. На соответствующих участках обработанного торца обнаруживаются и значительно более интенсивные следы вибраций. Кроме того, при обработке торцов большого диаметра развиваются низкочастотные колебания с частотой $f_{вр}$ вращения шпинделя, размах которых вблизи границы устойчивости не превышает 0,3 *мкм*.

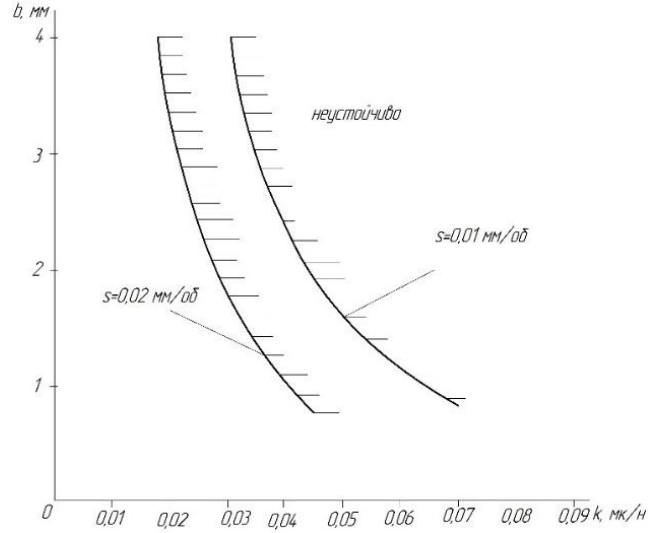


Рисунок 2 – Зависимости срезаемой ширины торца
от податливости подсистемы и подачи

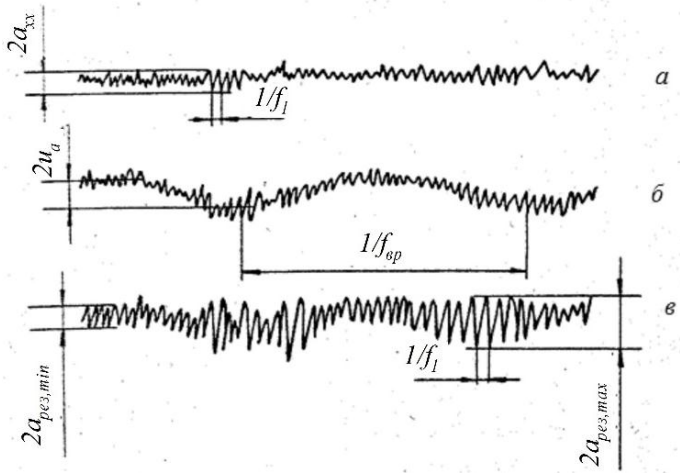


Рисунок 3 – Колебания модели приспособления
при холостом ходе (а),
при надежно устойчивом резании (б)
и вблизи границы устойчивости (в)

При подрезке стальных образцов диаметром 40 *мм* на модели приспособления по значениям частоты вращения $f_1 = 13\,Гц$ и собственной частоте упругой системы $f_1 \rangle 300\,Гц$ вычисляем безразмерную частоту параметрического возмущения $\upsilon = f_{вр.} / f_1 \langle 0,05$. При таких значениях υ нельзя ожидать появления параметрической неустойчивости, так как параметрические резонансы высоких порядков не возбуждаются.

При подрезке прерывистых торцов периодически повторяются процессы врезания и выхода инструмента, нарушая стационарность динамической системы станка и вызывая появление интенсивных внешних воздействий на процесс резания. Период этих воздействий задается частотой входа и выхода режущих лезвий. Эти воздействия возбуждают колебания станка, уровень которых значительно больше, чем при обработке сплошных поверхностей в аналогичных условиях [5].

Система уравнений движения рассматривается, как система с одной степенью свободы, замкнутая на процесс резания:

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + cx = \mu P_Z \Phi(t),$$
$$T_p \dot{P}_Z + P_Z = \left[-K_p x - \beta \frac{dz}{dt} + K_p W \right] \Phi(t), \qquad (5)$$

где β - определено экспериментально, как $dP_Z / d\dot{z}$ в зависимости от скорости резания ; W – приведенные значения толщины срезаемого слоя;

$\Phi(t)$ - функция времени, периода $T_в = (a_п + a_в)/V$, описывающая чередование замкнутых $(\Phi(t) = 1)$ и незамкнутых $(\Phi(t) = 0)$ состояний динамической системы. Эта функция определяется соотношениями

$$\Phi(t) = \begin{cases} 0 & при \quad iT_в < t < (i+g)T_в \\ 1 & при \quad (i+g)T_в < t < (i+1)T_в \end{cases} \qquad (6)$$
$$i = 0,1,2,.....$$

При записи уравнений учтено влияние «падающей» характеристики силы резания. Коэффициент β определен экспериментально как $dP_Z / d\dot{z}$ в зависимости от скорости резания. Закономерности изменения уровня колебаний показывают, что при обработки прерывистых поверхностей источниками колебаний являются внешние воздействия на процесс резания $(K_p W \Phi(t))$ и параметрические возмущения, причем последние являются существенными лишь при малых значениях $P_д / \omega$ ($P_д$ - круговая собственная частота системы с учетом демпфирования, ω - частота вращения).

Условие параметрической устойчивости получим для однородного уравнения

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + \left[c + \mu K_p \Phi(t) \right] y = 0. \tag{7}$$

Выполнив подстановку Эйлера

$$x = U \cdot e^{-ht/2m} \tag{8}$$

получим для функции U(t) уравнение Хилла с кусочно - постоянным параметрическим возмущением

$$\ddot{U} + P_{\partial}^2 \left[1 + 2v\Phi_1(t) \right] U = 0, \tag{9}$$

где

$$P_{\partial}^2 = c/m + \mu K_p / 2m + h^2 / 4m^2;$$
$$2v = \mu K_p / 2(c + \mu K_p),$$

P_{∂}^2 - круговая собственная частота с учетом демпфирования

$$\Phi_1(t) = 1 - 2\Phi(t) = \begin{cases} 1 & при \quad iT_в < t < (i+g)T_в \\ -1 & при \quad (i+g)T_в < t < (i+1)T_в \end{cases}$$

Обозначая функцию U индексами, соответствующими Φ_1, запишем условия сшивания и периодичности решений

$$\begin{aligned} U_1(gT_в) &= U_{-1}(gT_в), & U_{-1}(T_в) &= SU_1(0), \\ \dot{U}_1(gT_в) &= \dot{U}_{-1}(gT_в), & U_{-1}(T_в) &= S\dot{U}_1(0) \end{aligned} \tag{10}$$

Величина *S*, описывающая изменения решений уравнения (9) удовлетворяет уравнению

$$S^2 + 2SN + 1 = 0,$$

где

$$N = \cos(g \cdot P_{\partial} \cdot T_в \sqrt{1+2v} \cdot \cos\left[(1-g) \cdot P_{\partial} \cdot T_в \sqrt{1-2v} \right] - \\ - \frac{\sin(g \cdot P_{\partial} \cdot T_в \sqrt{1+2v} \cdot \sin\left[(1-g) \cdot P \cdot T_в \sqrt{1-2v} \right]}{\sqrt{1-4v^2}}. \tag{11}$$

Параметр N=$|1|$ определяет границу устойчивых решений , а при $|N|>1$ решения будут нарастать и система потеряет параметрическую устойчивость. На рисунке 4 приведены зоны устойчивых и неустойчивых решений для разных коэффициентов параметрического возбуждения 2v и g=0,5 и 0,1. Зная параметры замкнутой динамической системы, отношение частот p_{∂}/ω, а также параметрический коэффициент возбуждения 2v, определяем положение рабочей точки на диаграмме параметрической устойчивости (рис. 4). Таким образом, уже на стадии проектирования технологического процесса можно назначить параметры технологической системы и режима резания.

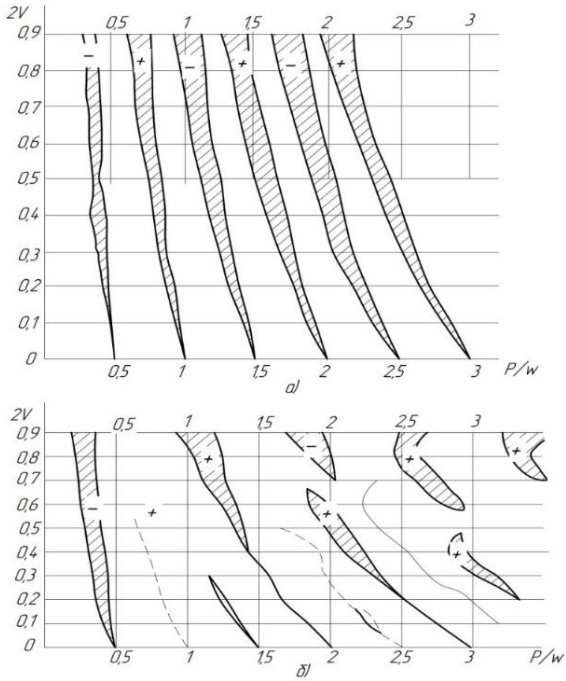
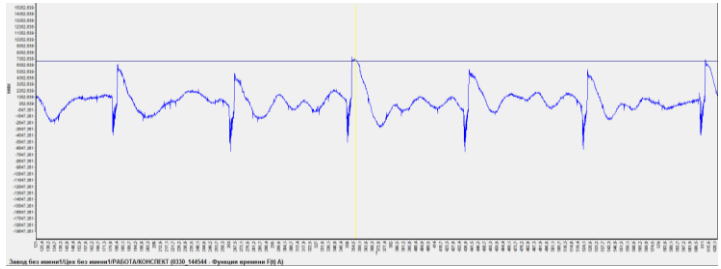
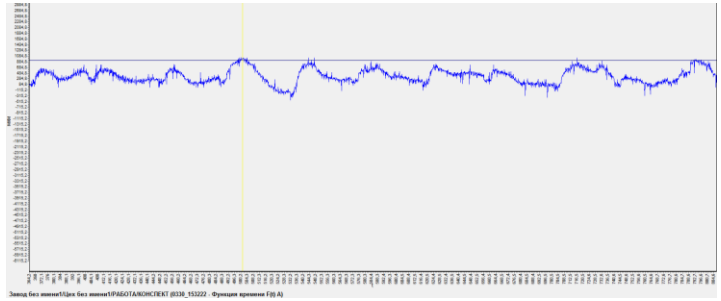


Рисунок 4 – Области параметрической устойчивости
при подрезке прерывистых торцов
(заштрихованы области неустойчивости),
а) - $g=0,1;$ б) - $g=0,5.$

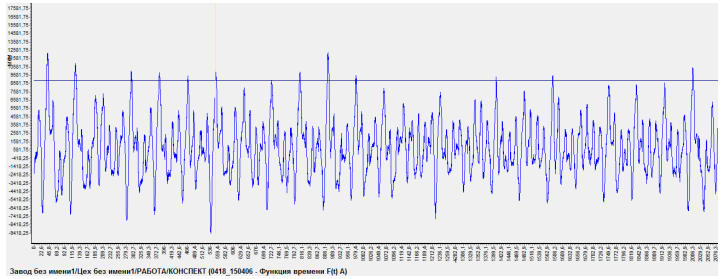
На рис. 5 приведены типичные осциллограммы колебаний при подрезке прерывистых торцов. Четко видны увеличения амплитуд колебаний при приближении к параметрическому резонансу, а также возмущающие гармоники.



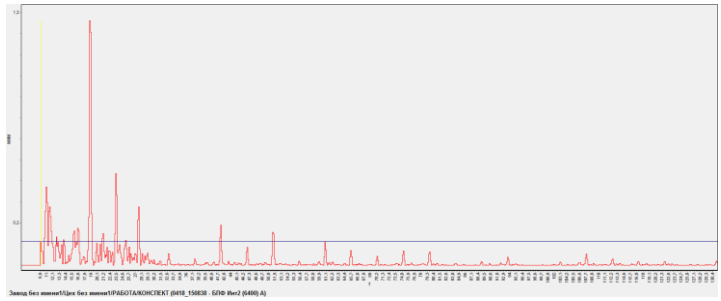
а) 1 паз, $n = 300$ *об / мин*



б) 2 паз, $n = 300$ *об / мин*



в) 4 паз, $n = 300$ *об / мин*



г) спектральный анализ 4 паза, $n = 300$ *об / мин*

Рисунок 5 – Осциллограммы колебаний при прерывистом резании

Выводы

1. Выполнены эксперименты по подрезке прерывистых торцов для изучения динамических процессов, определяющих качество обрабатываемой поверхности и ширину срезаемого торца.

2. Разработана методика и выполнены расчеты виброустойчивости ОРС при подрезке гладких и прерывистых торцов.

3. Выполнены расчеты параметрической устойчивости технологической системы при прерывистом резании.

4. Приведены осциллограммы экспериментальных исследований.

5. Изучены технологические особенности процесса тонкого точения при подрезке торцов.

Список использованных источников: 1. *В.М. Кобелев. Определение* виброустойчивости и жесткости станка при совмещении подрезки с растачиванием. *В.М. Кобелев, И.М. Творищук., Анд. А. Оргиян.* Сучасні технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць. Вип. 10. Харків: "ХПІ", 2015. – с. 47-54. **2.** *Вергилие И.С., Гольдрайс Г.М. Подрезка* широких торцов на алмазно-расточных станках. – Технология и организация производства. 1967, №3, с. 25-28. **3.** *Кудинов В.А. Динамика* станков. М., "Машиностроение", 1967, 359 с. **4.** *Ю.Ф. Копелев, В.М. Кобелев, О.И. Рябцев. Условия* устойчивости процесса подрезки терцев деталей широким резцом. Республ. межведом. науч.-техн. сб. "Технология и автоматизация машиностроения", вып. 10. Изд. "Техніка", Киев, 1975. **5.** Исследование виброустойчивости отделочно-расточных станков при подрезке торцов. *Творищук И.М., Оргиян А.А., Мацей Р.А.,* Материалы МНТК "Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта", 2016. **6.** *Линчевский П.А., Джугурян Т.П., Оргиян* А.А. *Обработка* деталей на отделочно-расточных станках. – Киев: Техника, 2001. – 300 с.

Bibliography (transliterated): **1.** *V.M. Kobelev.* Opredelenie vibroustojchivosti i zhestkosti stanka pri sovmeshhenii podrezki s rastachivaniem. *V.M. Kobelev, I.M. Tvorishhuk.,* And. *A. Orgijan*. Suchasni tehnologiï v mashinobuduvanni: Zb. nauk. prac'. Vip. 10. Harkiv: "HPI", 2015. – s. 47-54. **2.** Vergilie I.S., *Gol'drajs G.M.* Podrezka shirokih torcov na almazno-rastochnyh stankah. – Tehnologija i organizacija proizvodstva. 1967, №3, s. 25-28. **3.** *Kudinov V.A.* Dinamika stankov. M., "Mashinostroenie", 1967, 359 s. **4.** *Ju.F. Kopelev, V.M. Kobelev, O.I. Rjabcev*. Uslovija ustojchivosti processa podrezki tercev detalej shirokim rezcom. Respubl. mezhvedom. n. – t. sb. "Tehnologija i avtomatizacija mashinostroenija", vyp. 10. Izd. "Tehnika", Kiev, 1975. **5.** Issledovanie vibroustojchivosti otdelochno-rastochnyh stankov pri podrezke torcov. *Tvorishhuk I.M., Orgijan A.A., Macej R.A.,* Materialy MNTK "Progresivna tehnika, tehnologija ta inzhenerna osvita", 2016. **6.** *Linchevskij P.A., Dzhugurjan T.P., Orgijan A.A.* Obrabotka detalej na otdelochno-rastochnyh stankah. – Kiev: Tehnika, 2001. – 300 s.

УДК 621.923

А.В. РУДНЕВ, Харьков, Украина

ИНЖИНИРИНГ КАЧЕСТВА ШЛИФОВАНИЯ ЛЕЗВИЙНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ АТПМ

Представлені результати досліджень і аналіз інжинірингу якості дрібнозернистих алмазно-твердосплавних пластин після алмазно-іскрового шліфування. Показано, що вартісна оцінка якості є важливим фактором при оцінці технологій і способів виготовлення виробів.
Ключові слова: аналіз якості, дрібнозернисті алмазно-твердосплавні пластини

Представлены результаты исследований и анализ инжиниринга качества мелкозернистых алмазно-твёрдосплавных пластин после алмазно-искрового шлифования. Показано, что стоимостная оценка качества является важным фактором при оценке технологий и способов изготовления изделий.
Ключевые слова: анализ качества, мелкозернистые алмазно-твёрдосплавные пластины

The results of the research and the quality of the engineering analysis of fine-grained diamond-carbide inserts after the diamond-spark grinding. It is shown that the valuation of quality is an important factor in the evaluation of technologies and methods for the manufacture of products.
Keywords: quality analysis, fine-grained diamond-carbide inserts

Лезвийный инструмент из сверхтвёрдых материалов находит широкое применение в различных отраслях промышленности. Особый интерес при этом представляет алмазный инструмент, используемый на чистовых и финишных операциях, к которому предъявляются повышенные требования по точности и качеству. Показателями качества инструмента при оценке различных условий шлифования принято считать шероховатость поверхности, радиус округления и шероховатость режущей кромки, прочность кромки на микроскалывание, физическое состояние поверхностного слоя. Отмеченные показатели качества шлифованных поверхностей не однозначно влияют на предполагаемую работоспособность (стойкость) заточенного инструмента. Поэтому считается, что оценка работоспособности по другим критериям требует весьма взвешенного подхода.

Оценка, сравнение и анализ качественных характеристик изделий и инструмента в стоимостном выражении является перспективным направлением. Особенно важно оценивать надёжность инструмента в стоимостном выражении при создании и появлении новых инструментальных материалов, которые должны обеспечивать по своим физико–механическим свойствам и химическому составу потребности соответствующего технологического уклада. Потребителя интересует надёжность

© А.В. Руднев, 2016

приобретенной продукции, экономическая целесообразность её применения. Проблему качественного результата следует рассматривать не только и даже не столько при изготовлении изделий и инструмента, сколько в процессе их эксплуатации.

Здесь может быть весьма полезна концепция инжиниринга качества, предложенная Г. Тагути [1].

Главное в философии Тагути – это повышение качества с одновременным снижением расходов. При этом экономический фактор (стоимость) и качество анализируются совместно и таким образом связываются общей характеристикой, называемой функцией потерь. При анализе важно рассматривать потери, как со стороны потребителя, так и со стороны производителя.

Существует множество подходов, реализующих идею инжиниринга качества. Основной же его идеей следует считать необходимость постоянного совершенствования процессов и как следствие качества продукции. Согласно методу Тагути, качество не должно рассматриваться как мера соответствия требованиям стандартов, т.к. зачастую не просто требуется факт нахождения показателя в пределах допуска, а учёт фактора неравноценности значений показателя внутри допуска.

Основываясь на идее инжиниринга качества, был проведен анализ исследуемого процесса шлифования пластин АТПМ и работоспособности инструмента из них. Для этого целесообразно рассмотреть важнейшие составляющие суммарной технологической себестоимости, т.е. необходимо учесть стоимость обработки (заточки) режущего инструмента и стоимость его эксплуатации. Суммарная технологическая себестоимость выступает в данном случае в качестве интегрального показателя качества [2], который можно сравнить с функцией надёжности Тагути.

Для оценки реального состояния инструмента после шлифования в условиях эксплуатации, что важно для потребителя, применятся критерий, который оценивает интегральный показатель качества. Этот критерий учитывает стойкость инструмента, характеризуемую длиной пути резания в метрах (L, м) и соответственно себестоимость механической обработки резанием, а также удельную себестоимость шлифования и представляет собой суммарную технологическую себестоимость (Cm, коп/мин). Таким образом, фактически оценивается надежность инструмента в стоимостном выражении.

Стойкость, выраженная длиной пути резания, выбрана в качестве критерия оптимизации. Во многих случаях, особенно после шлифования инструментов по жёсткой схеме, оптимальные режимы и характеристики кругов, обеспечивающие минимальную удельную себестоимость шлифования, необходимо корректировать с учётом стойкости инструмента.

Технологическая себестоимость рассчитывалась по известной методике [3]. Формула для технологической себестоимости (*Cm*, коп/мин) имеет вид:

$$C_m = 70,79 + \frac{16100 \cdot V}{4L} + \frac{1,9 C_ш \cdot V}{4L} \ .$$

где Сш – удельная себестоимость шлифования (заточки), коп/см^3;

L – длина пути резания, м.

Таким образом, изменение технологической себестоимости определяется влиянием двух факторов – себестоимостью шлифования и стойкостью инструмента. Стойкость инструмента зависит от условий шлифования и геометрии заточки.

Заточка резцов проводилась на универсально–заточном станке модели 3Д642Е, модернизированном для обработки методом алмазно–искрового шлифования (АИШ). Шлифование осуществлялось с обратной полярностью подсоединением положительного полюса источника питания к алмазному кругу, а отрицательного – к обрабатываемому материалу. Источником питания являлся специальный генератор импульсов. Электрические режимы составляли: величина технологического тока *Icp* = 5А, частота электроимпульсов f = 44 кГц, скважность $n_{скв}$ = 2.

Пластины шлифовались кругом 12А2 АС6 100/80 М1-01 4. Скорость резания составляла 25 м/с.

Поскольку при постоянной геометрии инструмента наиболее существенное влияние на его стойкость оказывают механические режимы шлифования и, прежде всего, поперечная подача ($S_{поп}$, мм/дв.ход), от которой в значительной степени зависит производительность и себестоимость обработки, то поперечная подача была принята в качестве варьируемого фактора ($S_{поп}$ = 0,005 – 0,011 мм/дв.ход).

Стойкостные испытания проводились на токарно-винторезном станке модели 16К20. При проведении стойкостных испытаний заточенных на различных режимах резцов, в качестве обрабатываемого материала принят алюминиевый сплав марки АЛ26, содержащий 14,5% кремния (по данным лаборатории ОАО «Автрамат»). При обработке материалов этой группы (медные и алюминиевые сплавы с твёрдыми включениями) обнаруживается медленный регулярный износ инструмента, который носит усталостно-механический характер [4]. Износ здесь не связан с температурой в зоне резания, так как её уровень низкий.

Скорость резания выбиралась по рекомендациям [4] и была принята равной 3 м/с (180 м/мин). Глубина резания – 0,1 мм. В качестве варьируемого фактора при точении была принята подача S_o = 0,1 - 0,3 мм/об.

Критерием износа резца был принят износ по задней поверхности равный 0,1 мм.

Длина пути резания рассчитывалась по формуле:

$$L = \frac{\pi \cdot D \cdot l}{1000 \cdot S} \cdot i \text{ , м}$$

где D – диаметр заготовки, мм; l – длина заготовки, мм; S – подача, мм/об; i – число проходов.

Имея данные стойкостных испытаний, рассчитаем технологическую себестоимость. Результаты расчетов приведены в табл.

Таблица - Зависимость технологической себестоимости (Ст) от длины пути резания (L, м)

S, мм/об	Sпоп, мм/дв.х	L, м	Ст
0,1	0,005	4100	95,486
	0,008	3700	98,130
	0,011	3250	101,883
0,2	0,005	4000	96,104
	0,008	3550	99,286
	0,011	3100	103,388
0,3	0,005	3900	96,753
	0,008	3450	100,112
	0,011	3000	104,474

С ростом поперечной подачи в диапазоне 0,005...0,011 мм/дв.ход одновременно растёт производительность заточки, что приводит к снижению технологической себестоимости. Однако при этом стойкость обработанных пластин резко снижается.

Как показывает анализ таблицы, максимуму технологической себестоимости (минимальная поперечная подача при заточке инструмента) соответствует максимальная стойкость пластин и, соответственно, минимальная технологическая себестоимость.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что дополнительные затраты при заточке лезвийного инструмента перекрываются экономией при эксплуатации его у потребителя. Иными словами, качество обработки инструмента является доминирующим экономическим критерием при его изготовлении.

На основании изложенного можно утверждать, что качественные характеристики процессов обработки можно определять в стоимостном выражении, и следовательно стоимостная оценка качества несомненно является важным фактором при сравнительной оценке различных технологий и способов изготовления изделий.

Список литературы: 1. *Лапидус В. А.* Гуру менеджмента качества и их концепции: Э. Деминг, Дж. Джуран, Ф. Кросби, К. Исикава, А. Фейгенбаум, Т. Тагути / *Лапидус В. А.* // http://www.masters.donntu.edu.ua/2007/mech/tsunikova/library/2.htm. **2.** *Узунян М. Д.* Инжиниринг

качества шлифования / *Узунян М. Д.* // Резание и инструмент в технологических системах. – 2005. – Вып. 69. – С. 329 – 334. **3**. *Крючков В.Я.* Технологическая себестоимость обработки инструментами из безвольфрамовых твердых сплавов / *Крючков В.Я., Узунян М. Д.* //Сб. докл. всесоюзн. науч.-техн. конф.: Перспективы развития резания конструкционных материалов. – М., 1980. – с. 226–232. **4.** Лезвийный инструмент из сверхтвёрдых материалов: Справочник / *Н. П. Винников, А. И. Грабченко, Э. И. Грищенко и др*.; Под общ. ред. акад. АН УССР Н. В. Новикова. – К.: Тэхника, 1988. — 118 с.

Bibliography (transliteratrated): 1. *Lapidus V. A.* Guru menedzhmenta kachestva i ih koncepcii: *Je. Deming, Dzh. Dzhuran, F. Krosbi, K. Isikava, A. Fejgenbaum, T. Taguti / Lapidus V. A*. // http://www.masters.donntu.edu.ua/2007/mech/tsunikova/library/2.htm. **2**. *Uzunjan M. D.* Inzhiniring kachestva shlifovanija / *Uzunjan M. D*. // Rezanie i instrument v tehnologicheskih sistemah. – 2005. – Vyp. 69. – S. 329 – 334. 3. *Krjuchkov V.Ja*. Tehnologicheskaja sebestoimost' obrabotki instrumentami iz bezvol'framovyh tverdyh splavov / *Krjuchkov V.Ja., Uzunjan M. D*. //Sb. dokl. vsesojuzn. nauch.-tehn. konf.: Perspektivy razvitija rezanija konstrukcionnyh materialov. – M., 1980. – s. 226–232. 4. Lezvijnyj instrument iz sverhtvjordyh materialov: Spravochnik / *N. P. Vinnikov, A. I. Grabchenko, Je. I. Gricenko* i dr.; Pod obshh. red. akad. AN USSR N. V. Novikova. – K.: Tjehnika, 1988. — 118 s.

ЕКОНОМІКА ТА ОСВІТА

Н.В. ЗУБКОВА, канд. техн. наук,
В.М. ДОЛЯ, канд. техн. наук, Харків, Україна

ПІДГОТОВКА ФАХІВЦІВ СПЕЦІАЛІЗАЦІЇ «ІНСТРУМЕНТАЛЬНЕ ВИРОБНИЦТВО» В НТУ «ХПІ»

У статті представлено обґрунтування необхідності підготовки конкурентоспроможних фахівців спеціалізації «Інструментальне виробництво» у зв'язку з впровадженням кредитно-трансферної технології організації навчального процесу і розвитку інноваційно-технологічних кластерів у Харківському регіоні.
Ключові слова*:* підготовка фахівців, інструментальне виробництво

В статье представлено обоснование необходимости подготовки конкурентоспособных специалистов специализации «Инструментальное производство» в связи с внедрением кредитно - трансферной технологии организации учебного процесса и развития инновационно - технологических кластеров в Харьковском регионе.
Ключевые слова: подготовка специалистов, инструментальное производство

The paper presents the rationale for the training of competitive specialists specialization «Tool production» in connection with the introduction of the credit - transfer of technology of the educational process and the development of innovation - technological clusters in the Kharkov region.
Keywords: training of specialists, tool production

Сучасні потреби розвитку Харківського, а також у цілому всього Південно-східного регіону України як одного з найбільш високорозвинених у промисловому та науково-технічному відношеннях регіонів нашої держави. Завод ім. Малишева, ХТЗ, Харківський авіаційний завод, ФЕД, Турбінний завод і багато інших підприємств мають вагомий виробничий і кадровий потенціал та перспективи подальшого розвитку. Необхідність конкурентоспроможності потребує від сучасного машинобудування високого технічного рівня, якості і точності виробів, комп'ютерної автоматизації у сполученні з гнучкістю виробництва, використання новітніх наукоємних високих технологій і автоматизованих систем.

В теперішній час харківські підприємства здійснюють потрібні структурні зміни, модернізацію та переоснащення. При цьому нові технології та високопродуктивні верстати з системами комп'ютерного управління CNC повинні оснащуватися новими типами якісних, точних і ефективних інструментів. Це потребує розширення і удосконалення підготовки фахівців з інструментального виробництва у відповідності з новими сучасними вимогами.

© Н.В. Зубкова, В.М. Доля, 2016

Вищі навчальні заклади м. Харкова не готують фахівців за спеціалізацією «Інструментальне виробництво». Такі спеціалізації є в Національному технічному університеті «Київський політехнічний інститут», а також у Сумському технічному університеті, але ці вузи задовольняють потреби у фахівцях тільки для своїх регіонів.

Підготовка фахівців за спеціалізацією «Інструментальне виробництво» в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» повинно суттєво відрізнятися від тих, що вже є.

Перш за все це стосується змісту навчальних дисциплін. Найбільш повно і докладно потрібно обґрунтувати і викласти доцільність нових тенденцій розвитку інструментального виробництва, й особливо інструментів, що відповідають переліченим вище вимогам до сучасного комп'ютеризованого гнучкого машинобудування.

Висока продуктивність обробки і зменшення витрат від простоїв високо коштовного обладнання з системами CNC (ЧПУ) можуть бути досягнуті завдяки надійності, стійкості, точності, безпідналагоджуваності та швидкозмінності різальних інструментів. Це інструменти нового покоління.

В межах спеціалізації необхідно викладати пов'язані с цим сучасні питання:

– комп'ютерний дизайн в інструментальному виробництві;

– інструменти для автоматизованого комп'ютеризованого виробництва;

– особливості і переваги різальних інструментів зі змінними непереточуваними багатогранними пластинами, які завдяки відсутності паяння і переточування мають високу зносостійкість і міцність;

– універсалізація інструментів синтезом з елементів для гнучкої технології;

– безпідналагоджуваність інструментів як засіб скорочення тривалості простоїв верстатів і уникнення наладочного браку;

– інструменти та інструментальні матеріали для високоточної нанотехнології;

– інструментальні системи для багатоопераційних верстатів з системами комп'ютерного керування CNC;

– теорія формоутворення складних поверхонь;

– теорія проектування інструментів;

– інформаційні технології проектування та виготовлення інструментів;

– CAD/CAM/CAE технології складних поверхонь;

– способи формоутворення прогресивних конструкцій інструменту та технологій їх виготовлення.

Фахівці зі спеціалізації «Інструментальне виробництво» повинні мати знання інженерів-механиків зі знаннями користувачів комп'ютерних систем та технологів-програмістів на верстатах з ЧПК. Володіючи прогресивними формоутвоюючими технологіями, вони будуть здатні здійснювати віртуальний інжінірінг, проводити дослідження та використовувати ці технології.

Необхідно передбачити, щоб навчальні дисципліни спеціалізації мали сучасну теоретичну базу, яка охоплює узагальнену класифікацію інструментів за способами формоутворення поверхонь, теорію 3D моделювання та автоматизованого проектування інструментів у середовищі CAD-систем (у тому числі у CAD-системі, розробленої в НТУ «ХПІ»).

У спеціальних розділах дисциплін необхідно розглядати специфіку сучасної комп'ютеризованої технології інструментального виробництва, в тому числі нові технології нанесення багатошарових зносостійких покриттів і інтегрованої технології виготовлення прототипів, інструментів і деталей нарощуванням Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing (RPTM) на новітньому обладнанні, яке має НТУ «ХПІ».

Вище викладене підтверджується і даними з середньорічної потреби у цих фахівцях: тільки у харківському регіоні у кількості порядку 25 фахівців з інструментального виробництва на період з 2015 по 2020 роки. Наведену чисельність фахівців виявлено за результатами опитування тільки провідних машинобудівних підприємств, хоча потребу у фахівцях мають також середні і малі підприємства.

Таким чином, зважаючи на велику кількість підприємств і організацій у Харківському регіоні та їх потреби у фахівцях галузі знань «Механічна інженерія» можна зробити висновок, що випускники кафедри «Інтегровані технології машинобудування» за спеціальністю «Прикладна механіка» спеціалізації «Інструментальне виробництво» будуть користуватися попитом на ринку праці в Харківському регіоні, а також за його межами.

Інтеграція України у світогосподарський простір вимагає подальшого розвитку малого підприємництва і збільшення його внеску в нарощування інноваційного потенціалу регіону. Харківська область є лідером кластеризації у сфері високих технологій, що пояснюється її високим науково-технологічним потенціалом. Національним технічним університетом «Харківський політехнічний інститут» і Індустріальною групою УПЕК, створено кластер – Навчально-науково-виробничий комплекс (ННВК) «Техноград», націлений на розв'язання проблем механіки, машинознавства, енергетики і машинобудування, а в його рамках відкрито унікальний

спеціалізований навчально-дослідний клас-кластер «Політехнік-125». Створення цього навчально-дослідного класу-кластера – результат співпраці НТУ «ХПІ», ІГ УПЕК, компаній РТС (США). Фахівці спеціалізації «Інструментальне виробництво» на базі ННВК мають змогу проводити науковий супровід сучасних проектних розробок на світовому рівні, розробляти унікальні спеціалізовані мета-системи комп'ютерного моделювання фізико-механічних процесів у складних та надскладних механічних системах, інтегрувати наукові розробки вітчизняних вчених із самими передовими комп'ютерними технологіями, а також безпосереднє впроваджувати ці розробки у навчальний процес, науково-дослідні роботи та у виробництво.

Все це дає можливість промисловим підприємствам, науково-дослідним інститутам та конструкторським бюро в співдружності з НТУ «ХПІ» вирішувати масштабні завдання, що не під силу іншим науково-освітнім установам: проведення унікальних досліджень з моделюванням складних нелінійних процесів; підготовка інженерних і наукових кадрів за індивідуальними навчальними програмами; просування найбільш перспективних комп'ютерних систем на ринок Україні.

Також Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» став ініціатором регіонального аерокосмічного кластера «Мехатроніка», в який увійшли також провідні підприємства та наукові заклади – ПАТ «ФЕД», Харківське державне авіаційне виробниче підприємство, ПАТ «ХАРТРОН», Національний аерокосмічний університет ім. Жуковського, Харківський авіаційний інститут.

Кафедра «Інтегровані технології машинобудування» приймає участь у міжнародному проекті «Подвійний магістерський ступінь з автоматизації/мехатроніки в ЄС - країнах партнерах». Учасники цього проекту університети з таких країн: Україна, Болгарія, Чехія, Франція. Реалізація цього проекту вже дала можливість студентам кафедри отримати європейський диплом зі спеціальності «Мехатронні системи» у Технічному університеті Софії (Болгарія) без відриву від навчання в НТУ «ХПІ». Студенти протягом трьох місяців навчання у Софії пройшли курси за декількома дисциплінами спільної магістерської навчальної програми, виконали дипломне проектування та захистили диплом у січні 2014 р.

Враховуючи основні задачі, які постають перед вищими навчальними закладами в зв'язку з впровадженням кредитно-трансферної технології організації навчального процесу і розвитку інноваційно-технологічних кластерів в Харківському регіоні, зусилля колективу кафедри «Інтегровані

технології машинобудування» спрямовані на підготовку конкурентоспроможних фахівців спеціалізації «Інструментальне виробництво» відповідно досягнень світової та вітчизняної науки і освіти, загальнодержавного рівня знань, умінь та вимог міжнародних критеріїв і стандартів вищої освіти.

Фахівці за спеціалізацією «Інструментальне виробництво» зможуть виконувати види інженерної та наукової діяльності відповідно до Державного класифікатора видів діяльності, в т.ч. розробляти нові технології та технічні засоби їх реалізації в умовах комп'ютеризованого інтегрованого виробництва. Вони зможуть працювати в усіх галузях народного господарства, організовуючи підготовку виробництва та забезпечуючи випуск сучасних виробів, займаючи при цьому посади:

– інженерів з експлуатації та обслуговування сучасних верстатів автоматизованого виробництва,

– інженерів – менеджерів по впровадженню,

– керівників виробничих дільниць та виробництв,

– проектувальників та технологів інструментальних та механічних цехів,

– конструкторів та технологів з розробки інструменту, штампів, пресформ та іншого оснащення,

– технологів – програмістів розробки програм для верстатів з ЧПК;

– працівників галузевих міністерств.

Також магістри за спеціалізацією «Інструментальне виробництво» зможуть працювати спеціалістами з розробки науково – дослідних програм підготовки та організації виробництва, керівниками проектів, провідними спеціалістами фірм та підприємств, керівниками підрозділів провідних інженерів – конструкторів, спеціалістами з розробки формоутворюючих технологій та інтегрованих систем у галузі формоутворення, спеціалістами – дослідниками у галузі формоутворення і проектування інструменту та оснастки, інженерами-дослідниками на промислових підприємствах, науковими співробітниками в науково дослідних та проектних інститутах, викладачами.

Метою підготовки бакалаврів та магістрів зі спеціалізації «Інструментальне виробництво» – є формування висококваліфікованого фахівця, який за певний термін навчання у вищому закладі здобуде поглиблені спеціальні уміння та знання інноваційного характеру, матиме досвід їх застосування та продукування нових знань для вирішення професійних завдань у певній галузі народного господарства.

Г.П. КРЕМНЕВ, канд. техн. наук,
А.А. ОРГИЯН, д-р техн. наук, Одесса, Украина

ОСОБЕННОСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПОДГОТОВКИ БАКАЛАВРОВ И МАГИСТРОВ

Про деякі нові особливості удосконалення підготовки бакалаврів та магістрів. Сформовано новий погляд на головний продукт ВНз бакалавра та магістра, його місце, склад та особливості підготовки в новий умовах.
Ключові слова*:* удосконалення підготовки бакалаврів та магістрів

О некоторых новых особенностях совершенствования подготовки бакалавров и магистров. Сформирован новых взгляд на главный продукт ВУЗа бакалавра и магистра, его место, структуру и особенности подготовки в новых условиях.
Ключевые слова: совершенствование подготовки бакалавров и магистров

On some features of bachelor and master preparing to improve the preparing. A new insight is made as for bachelor and master preparing as wall as place, structure and features in the new conditions.
Keywords: improvement in preparing bachelor and master

Новый закон «Украины Об образовании» поставил перед ВУЗами и выпускающими кафедрами ряд новых требований к процессу подготовки, к которым, на наш взгляд, можно отнести такие:

- формирование имиджа ВУЗа и его привлекательности для абитуриента;
- формирование привлекательности специальности ВУЗа для конкретного абитуриента;
- современность и перспективность подготовки по избранной специальности в ВУЗе;
- востребованность будущего бакалавра и магистра на рынке труда.

Авторы не берут на себя труд давать рекомендации по формированию имиджа ВУЗа, но на примере специальности «Прикладная механика» со специализацией «Компьютерное проектирование инновационных технологий» хотели бы поделиться своими мыслями о возможности обеспечения других требований и имплементация их в документы, которыми выпускающая кафедра будет вести подготовку специалистов: образовательную программу, РУП и программы учебных курсов.

Привлекательность специальности для молодого человека, поступающего в ВУЗ, может быть выражена примерами из биографии тех людей, которым доверяют и которым хотят следовать, активной рекламной компанией в разных СМИ и активным индивидуальным контактом абитуриента и представителя ВУЗа или кафедры. Эти два последних

© Г.П. Кремнев, А.А. Оргиян, 2016

направления не являются чем-то новым, ранее не существовавшим, просто сегодня необходим прямой индивидуальный разговор, убеждение и вовлечение молодежи в круг лиц, которые станут абитуриентами.

Современность и перспективность подготовки очень сложное и трудоёмкое требование, которое базируется не только на следовании моде дня, но и на большой работе по формированию программ подготовки, формированию компетенций, знаний и умений и многому другому, что будет определять лицо бакалавра или магистра в перспективе на ряд лет. Рассматривая выбранную нами специализацию по прикладной механике, сделаем попытку «нарисовать» словами портрет бакалавра и магистра, какова их общая компетенция. Итак, бакалавр по прикладной механике со специализацией в области проектирования инновационных (вновь создаваемых) технологий – это человек, который разбирается (анализирует, классифицирует, проектирует) в механизмах и системах механизмов, работающих в общем, транспортном, сельскохозяйственном машиностроении, станкостроении и робототехнике; может на типовые детали механизмов или типовые системы механизмов средней степени сложности проектировать типовые процессы их изготовления и контроля и намечать некоторые пути автоматизации этих процессов; оформлять техническую документацию для действующих производств. Все эти действия бакалавр выполняет на современной цифровой базе и цифровых технологиях, системах САПР-К и САПР-ТП- основе его подготовки за весь цикл обучения. Можно в этом плане говорить о современности подготовки бакалавра.

Магистр по тому же направлению – это человек, который может проектировать индивидуальные процессы изготовления объектов, разрабатывать модели объектов и процессов, исследовать их, обрабатывать результаты исследований, готовить отчеты и публикации и методики ведения процессов, включая учебный процесс в ВУЗе. В основе его подготовки та же цифровая база, что была заложена у бакалавра и, следовательно, это современность его подготовки.

Человек, получивший подготовку по циклу бакалавра и магистра, – это специалист по механизмам и процессам их изготовления, контроля и автоматизации, моделированию и исследованию процессов и созданию методик их проведения, обработке и систематизации данных.

Научная составляющая подготовки специалиста бакалавра и магистра – это перспективность его развития в дальнейшем: очень сложно дать на 100% точный адрес места работы этого человека и описать функции, но благодаря заложенным в него инструментам (моделировать, исследовать, разрабатывать методики, готовить информационные материалы, отчеты и публикации) этот человек сумеет легко войти в новый круг обязанностей, объектов и др. Этот тезис является и одной из положительных характеристик для востребованности на рынке труда такого специалиста, его готовности к

адаптации, встройке, накоплению новых сведений, их обработке, переработке и применению. Чтобы «создать» бакалавра и магистра по этим лаконичным сведениям необходимо, очевидно, более подробная трактовка, описание этих свойств, которые ВУЗ должен сформировать за годы учебы, фигурально выражаясь построить «дом бакалавра» и «дом магистра». Эти дома имеют фундамент, стены и крышу, пристройки. Итак, дом бакалавра стоит на фундаменте из общечеловеческих общеинженерных знаний, присущих современному специалисту. Это знания по истории, философии, экономике, политологии, экологии и безопасности жизнедеятельности, физическому совершенствованию организма и набор знаний из естественных наук: высшей математики, физики, химии и информатики. Одной из стен, при этом капитальной, является стена механизмов, т.е., блоков знаний законов и умений вести расчеты механизмов или их систем в статике, кинематике и динамике, разрабатывать детали механизмов и сами механизмы средней степени сложности, материализовывать представление деталей и самих механизмов в цифровом виде, вести их расчеты и вводить детали и сборочные единицы в стандартизованное поле размеров, допусков, материалов, методов управления свойствами материалов и методов измерения параметров материалов и размеров деталей с учетом представлений, условий и ограничений будущего производителя. Другой капитальной стеной является «профессиональная» стена, на блоках которой записаны знания и умения представлять типовые методы и типовые технологии воспроизведения реальных поверхностей по цифровым конструкторским документам и цифровым технологиям, намечать пути автоматизации процессов изготовления деталей механизмов и создавать представления о рыночной экономике и законах и правилах управления процессами.

Соединяет эти капитальные стены перегородка, на блоках которой записаны знания и умения вести работы на ЭВМ или ПЭВМ по принятым ПП в сфере САПР-К и САПР-ТП на деловом украинском языке или одном из иностранных так, чтобы техническая документация была бы идентична документации предприятия и могла бы ею стать.

Крышей дома бакалавра должна быть его выпускная работы, в которой на базе заданного механизма или системы механизмов произведен его синтез и анализ, выполнено цифровое его воспроизведение, произведены расчеты прочности, жесткости и долговечности, материализованы несколько деталей этого механизма и на них выбраны заготовки, типовые ТП, типовая технологическая оснастка и методы контроля параметров деталей и сделана технологическая документация их изготовления по действующим компьютерным версиям САПР-ТП.

На наш взгляд, выпуская работа должна готовиться бакалавром с начала обучения для чего выпускающая кафедра выдает ему задание. Это задание может быть выдано на I курсе в I семестре и может звучать, например, так:

1. «Спроектировать домкрат для подъема автомобиля массой 1,2 *т* на высоту 300 *мм*, разработать ТП изготовление деталей при выпуске изделий в количестве заданной программе выпуска на протяжении N лет, с такими особенностями предприятия-изготовителя: (дается перечень процессов, оборудования и др.)»

2. «Спроектировать поворотное загрузочное устройство деталей типа вал (*l*=…*мм*; *d*=….*мм*; масса станка ….*кг*) с конвейера на станок (указывается модель и др. параметры МС) с переменным циклом работы, разработать ТП изготовления деталей .(продолжение см. п.1).

3. «Спроектировать механизм подъема (спуска) инвалидной коляски (габариты и масса задаются) на лестницу, разработать ТП изготовления деталей механизма … (продолжение см. п.1).

Перечень таких заданий профилирующая кафедра разрабатывает для каждого набора, согласовывает его с теми кафедрами, которые будут соучастниками выполнения его (обычно на этих кафедрах в РУП заложены КР или КП) и выдает студенту.

В портфеле заданий кафедры могут быть и заказы внешних организаций, и тогда возникает реальность объекта-задания, его внедрение по разработанным документам и т.д. Студент с этим заданием проходит как стадии абстрактного представления, так и материализация объекта-задания, и это превращение происходит при изучении курса «Компьютерные проектирование деталей машин» и выполнении курсового проекта по этому курсу, в результате чего у исполнителя появляется конструкторские чертежи сборочных единиц и нескольких деталей, позволяющие ему вести изучение предметов профессионального блока на реальной базе, а при проведении некоторого поиска и на новый авторской базе материалов для изучения последующих дисциплин. Этот поиск может быть связан с компоновками конструкций, новыми схемами, новыми материалами деталей, новыми методами контроля параметров и другого, что будет характеризовать новизну решения, может быть даже иногда его футуристичность, некую иллюзию, но это допустимо для учебного материала.

Чтобы такой дом закрыть, и он стал бы функционально пригодным, т.е. практически полезным для людей, необходимо его рыночная привлекательность. Чем же кроме указанного выше может бакалавр заинтересовать рынок? Поднять свою цену? Это должно быть индивидуальное качества: нет-нет, мы не предлагаем певца и танцора или велосипедиста, хотя такие тоже встречаются.

Бакалавр, если хочет, может получить навыки рабочей профессии или разряд, например, оператора каких-то машин, токаря 1-2 разряда и др., занимаясь вне стен ОНПУ, но по согласованным с ОНПУ планам, например, в ПТУ или учебном центре в свободное от учебы время. Такое сочетание

рабочего и инженерного образования на рынке труда будет востребовано в первую очередь.

Мы не исключаем, что глубокое знания одного или двух иностранных языков резко повышают также ценность объекта на рынке труда, поэтому мы предлагаем изменить статус иностранного языка как средства технического общения на более высокий уровень делового языка бакалавра, достаточного для ведения технической документации, перевода и свободного общения, и для этого ввести госэкзамен по иностранному языку. В ОНПУ накоплен большой опыт по обучению студентов-иностранцев русскому и украинскому языкам, и многие эти студенты вполне свободно ими овладевают. Осталось совершить обратный процесс с той же долей эффективности, и мы в это верим.

А как же должен выглядеть дом магистра на основе сказанного ранее? Он, что, будет другим? На наш взгляд, то, что построено, следует сохранить и усовершенствовать, расширить: достроить «лоджии», «балконы», «мансарду» и др.

Мы полагаем, что общей компетенцией магистра может быть такая : на базе фундаментальных, общечеловеческих и общеинженерных понятий и решений в области прикладной механики набор логически взаимосвязанных знаний и умений, позволяющий проектировать индивидуальные технологические процессы и объекты для их функционирования на основе цифровых технологий, разрабатывать модели объектов и процессов и исследовать их с помощью цифровых технологий, обрабатывать результаты исследований, готовить отчеты и публикации, рекламные продукты и разрабатывать методики подготовки процессов, включая и учебный процесс в ВУЗе. Если бакалавр – специалист по механизмам или системам механизмов и типовым процессам из воспроизведения, магистр – это специалист по проектированию технологических индивидуальных процессов воспроизведения объектов, созданию базы для этих процессов, например, режущих инструментов и др., моделированию и исследованию процессов и объектов и методическому обеспечению процессов, включая и учебный процесс в ВУЗе.

В «доме магистра» к уже ранее построенному зданию бакалавра добавляется пристройка из компетенций вести компьютерное проектирование технологий в рамках технологической подготовки производства, компьютерное проектирование режущих инструментов, анализ и синтез ГАП, предлагать ресурса- и энергосберегающие технологии и обеспечивать их менеджмент, рекомендовать технологические методы повышения эксплуатационных возможностей деталей машин (а это все инновации!). Надстройка в доме может быть сооружением из блоков знаний и умений в области моделирования ТП, решения задач оптимизации в технологии производства, научным проблемам современных технологий, методологии и

организации НИР, экономике и организации инновационной деятельности, управлению инновациями и маркетингу инноваций. Это научная база магистра. Балконом в этом доме может быть конструкция из блоков знаний в области педагогики и психологии ВШ, методологии преподавания в ВШ, патентоведении и интеллектуальной собственности. Парадной «дверью» этого дома является выпускная работа магистра, например на тему: «Исследование индивидуального процесса изготовления детали…. механизма…., создание модели колебаний в ходе технологической операции №… и ее исследование….». обязательным атрибутом этой работы должна служить научная статья магистра, заявка на приоритет, товарный знак или что-то другое, подтверждающее новизну работы.

На основе изложенного выше можно представить структуру образовательной программы (ОП) бакалавра и магистра.

Итак, ОП бакалавра на основе его общей комплектации состоит из нескольких блоков компетенций: №1 - общечеловеческие, культурные и естественно научные; №2 - общетехнические, общенаучные и инструментальные; №3 - общепрофессиональные; №4 - специальные; №5 - информационные. ОП магистра имеет такие блоки: №1 - профессиональные компетенции; №2 - методологические; №3 - научные. Раскроем на примере блоков №3 бакалавра и №1 магистра структуру их, переход от компетенций к предметам обучения, а в предмете обучения- формированию умений и их обеспечению материалами учебного процесса. В блоке №3 компетенций бакалавра могут выглядеть так: способность различать, ориентироваться и:

- знать теорию разрушения-резания материалов и необходимые для этого инструменты, уметь назначить и выбирать кинематику основных процессов формирования и оценить конечный результат;

- знать и классифицировать технологические машины, описывать их устройство, особенности эксплуатации и уметь назначить их для ведения процесса;

- знать и уметь описывать, анализировать и выбирать процессы изготовления заготовок из металлов и неметаллов, проектировать заготовки и вести технологические расчеты заготовок деталей базовых групп в разных типах производства;

- знать и уметь выбирать, рассчитывать и разрабатывать технологические приспособления I-IV групп сложности с применение САПР-К;

- знать и уметь анализировать, описывать, разделять и выбирать методы обработки типовых поверхностей деталей машин, уметь устанавливать их ошибки при изготовлении и показатели качества поверхности и оценивать производительность и эффективность методов обработки;

- знать и уметь вести технологическую подготовку производства типовых деталей на базе типовых решений с использованием САПР-ТП.

В блоке №4 магистра компетенции таковы: способность описывать, выбирать и:

- знать и уметь на базе существующих компьютерных технологий вести разработку индивидуальных ТП в рамках технологической подготовки производстве;
- знать и уметь разрабатывать УП для машин с ЧПУ на базе МС токарных, фрезерных и расточных и операционную технологию обработки;
- знать и уметь анализировать действующие ТП по затратам материалов, времени и энергии и корректировать их с целью уменьшения затрат;
- знать и уметь оценивать методы обработки с позиции долговечности действующих конструкций и назначать корректирующие решения по повышению долговечности;
- знать и уметь проектировать РИ на основе существующих компьютерных технологий;
- знать и уметь анализировать ГПС, синтезировать их структуру и разрабатывать требования на разработку новых.

По нашим предположением за каждой из этих компетенций в глубине виден предмет - учебный курс ее обеспечивающий, а в нем знания и умения, которые получит студент в ходе изучения (это будет изложено в РП курса). Так, компетенция «знать и уметь анализировать, описывать, разделять и выбирать методы обработки типовых поверхностей деталей машин, уметь устанавливать их ошибки при изготовлении и показатели качества поверхности и оценивать производительность и эффективность методов обработки» может быть обеспечена в курсе «Технологические основы машиностроения» (ТОМ). При изучении этого курса имеется КЛ и учебные пособие [3], и они помогают сформировать такое:

- уметь анализировать объект производства и давать его оценку; уметь находить ошибки при его изготовлении и показатели качества поверхности [3, работы 2.1; 2.2.];
- уметь назначать методы обработки по заданным показателям точности обработки и качества поверхности [3, работа 2.3];
- уметь находить припуск на обработку поверхности при заданном методе получения заготовки и маршруте обработки [3, работа 3.5];
- уметь выбирать составные части методов лезвийной обработки поверхностей [3, работа 4,1; 4,2; 4,3; 4,4];
- уметь разрабатывать технологическую схему сборки механизма [3, работа 5,1; 5,2; 5,3].

Компетенция магистра «знать и уметь анализировать действующие ТП по затратам материалов, времени и энергии корректировать их с целью уменьшения затрат» может быть обеспечена при изучении курса «Ресурсо и энергосберегающие технологии и их менеджмент» (РЭТМ), для которого также разработаны учебные пособия, обеспечивающие формирование знаний

и умений [4, 5]. Аналогично предмету по курсам ТОМ и РЭТМ можно построить и остальные курсы, и на выпускающей кафедре такая работа проводится, при этом авторы делали ранее упор на обеспечение этих работ [1, 2] и продолжают их. Авторы ищут подрядчиков , заказчиков, исполнителей и других лиц, которые согласны с ними и готовы соучаствовать в совершенствовании подготовки бакалавров и магистров по «Компьютерному проектированию инновационных технологий», и просят обращаться по телефонам +380487058382; +380487058629; 0674804285 или по адресу 65044, Одесса, пр-т Шевченко 1, ОНПУ, кафедра технологии машиностроения.

Список использованных источников: 1. *Оргиян А.А., Кремнев Г.П., Колесник В.М*. Повышение уровня практической подготовки бакалавров по ТМ. Сб. «Сучасні технології в машинобудуванні», Зб. наук. праць, вип. 9, Харків. – 2014, с. 288-295. **2.** *Оргиян А.А., Кремнев Г.П., Колесник В.М*., Совершенствование уровня технологической и практической подготовки бакалавров и магистров. Сб. «Сучасні технології в машинобудуванні». Зб. наукових праць, вип. 10, 2015, с. 214 – 218. **3.** *Кремнев Г.П., Бердичевский Е.Г*. Технологические основы машиностроения. Учебное пособие. Великий Новгород, Новг. ГУ им. Ярослава Мудрого, 2014. – 216с. **4.** *Кремнев Г.П., Бердичевский Е.*Г. Ресурсо- и энергосберегающие технологи в машиностроении. Учебное пособие, Великий Новгород, Новг.Г.У им. Ярослава Мудрого, 2015. – 126с. **5.** *Кремнев Г.П., Новиков* Ф.В. Ресурсо- и энергосберегающие технологии в машиностроении. Учебное пособие, Д, Лира, 2016. – 297с.

Bibliography (transliterated): 1. *Orgijan A.A., Kremnev G.P., Kolesnik V.M*. Povyshenie urovnja prakticheskoj podgotovki bakalavrov po TM. Sb. «Suchasni tehnologiї v mashinobuduvanni», Zb. nauk. prac', vip.. 9, Harkiv. – 2014, s. 288-295. **2.** *Orgijan A.A., Kremnev G.P., Kolesnik V.M*., Sovershenstvovanie urovnja tehnologicheskoj i prakticheskoj podgotovki bakalavrov i magistrov. Sb. «Suchasni tehnologiї v mashinobuduvanni». Zb. naukovih prac', vip.. 10, 2015, s. 214-218. **3.** *Kremnev G.P., Berdichevskij E.G*. Tehnologicheskie osnovy mashinostroenija. Uchebnoe posobie. Velikij Novgorod, Novg. GU im. Jaroslava Mudrogo, 2014 – 216s. 4. *Kremnev G.P., Berdichevskij E.G*. Resurso- i jenergosberegajushhie tehnologi v mashinostroenii. Uchebnoe posobie, Velikij Novgorod, Novg.G.U im. Jaroslava Mudrogo, 2015. – 126s. 5. *Kremnev G.P., Novikov F.V*. Resurso- i jenergosberegajushhie tehnologii v mashinostroenii. Uchebnoe posobie, D, Lira, 2016. – 297s

УДК 65.012.32 (075)

Г.К. КРИЖНИЙ, канд. техн. наук,
Н.В. КОЗАКОВА, канд. техн. наук**,**
Е.В. НОРІК, Харків, Україна

ОРГАНІЗАЦІЯ МЕНЕДЖМЕНТУ ЯКОСТІ НА БАЗІ СТАНДАРТУ IDEF0 НА ВИРОБНИЧОМУ ПІДПРИЄМСТВІ

В статті аналізується проблема втрат якості продукції в процесі її виготовлення та, як наслідок, її цінності для споживачів. Ця проблема розглядається стосовно двох циклів життя продукції: циклу життя кожного окремого виробу, та узагальненого циклу життя певної продукції, що знаходиться у виробництві на даному підприємстві. Пропонується посилити моніторинг втрат якості продукції у цих двох циклах життя, досить різних, але взаємопов'язаних. Для реалізації намічених змін пропонується широко застосовувати стандарт IDEF0 та існуючі в Японії інструменти забезпечення якості продукції не тільки у процесах безпосереднього виробництва продукції, а і на етапах розробки нового виробу та підготовки його до промислового виробництва.
Ключові слова: два цикли життя продукції, стандарт idef0, моніторинг втрат якості, цінність продукту для споживача, контрольна карта, діаграма Ісікави, система менеджменту якості, маркетингові дослідження, маркетингова концепція нового виробу

В статье анализируется проблема потерь качества продукции в процессе ее изготовления и, как следствие, ее ценности для потребителей. Эта проблема рассматривается в отношении двух циклов жизни продукции: цикла жизни каждого отдельного изделия, и обобщенного цикла жизни определенной продукции, находящейся в производстве на данном предприятии. Предлагается усилить мониторинг потерь качества продукции в этих двух циклах жизни, достаточно разных, но взаимосвязанных. Для реализации намеченных изменений предлагается широко применять стандарт IDEF0 и существующие в Японии инструменты обеспечения качества продукции не только в процессах непосредственного производства продукции, а и на этапах разработки нового изделия и подготовки его к промышленному производству.
Ключевые слова: два цикла жизни продукции, стандарт idef0, мониторинг потерь качества, ценность продукции для потребителя, контрольная карта, диаграмма Исикавы, система менеджмента качества, маркетинговыеі исследования, маркетинговая концепция нового продукта

In the article the problem of loss of product quality in the process of production and, consequently, its value to consumers. This problem is considered in relation to two life cycles of products: life cycle of each product, and generalized life cycle of a product that is in production at this plant. It is proposed to strengthen the monitoring of product quality losses in the two cycles of life, very different, but related. To implement the planned amendments proposed IDEF0 standard widely used in Japan and existing tools to ensure the quality of products not only in the direct process of production, but also during the development of new products and prepare it for industrial production.
Keywords: two life cycles of products, standard idef0, monitoring quality loss, the value of the product to the consumer, control card, Ishikawa diagram, quality management system, marketing research, marketing a new product concept

Постановка проблеми. У зв'язку з розвитком прагнення до підвищення якості продукції, що є не тільки актом доброї волі, а й наслідком жорсткої конкуренції на ринках, підвищується статус підрозділів підприємств, відповідальних за якість. Якщо раніше це була служба головного контролера, яка по суті є технічною, то тепер з'являються підрозділи, що мають визначати

© Г.К. Крижний, Н.В. Козакова, Е.В. Норік, 2016

політику в області якості. Перед ними постає проблема – в якому напрямі рухатися, які кадри підбирати, яку структуру повинна мати система менеджменту якості. З одного боку наша задача полегшується тим, що розвинені країни уже знайшли і розвинули свої шляхи виробництва високоякісної продукції. Нам залишається зробити свій вибір і запровадити у себе один із цих шляхів, враховуючи наші певні особливості. Але і ця задача непроста, підтвердженням чого є стан справ у промисловості.

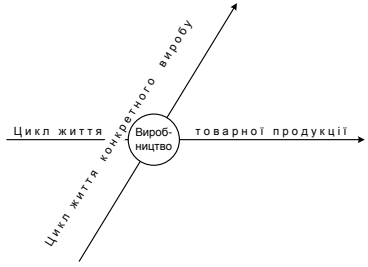
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із перспективних напрямків досліджень є *моніторинг втрат якості* [1, 2], який базується на використанні процесного підходу в методології стандарту IDEF0. В цій роботі слушно відмічається, що втрати якості продукції відбуваються паралельно з наданням цій продукції властивостей, які розцінюються споживачами як певна для них цінність. Тільки при веденні процесу по створенню цінності допускаються помилки по його реалізації, які приводять до втрат цінності, який не досягає її очікуваного рівня, або ж потенційно досяжного рівня на даному етапі розвитку суспільства. Звідси робиться висновок, що якість продукції досягається лише через управління якістю виконання процесів.

Цей висновок видається очевидним. Дійсно, завжди в разі виявлення браку знаходили виконавця операції, де брак з'явився, і наказували його. Вважалося, що саме він є винуватцем браку.

А що ж нового з'явилося в цьому плані? Новим є те, що процес піддається декомпозиції, а потім аналізується весь процес, усі його складові, а не тільки дії робітника.

Невирішеними залишаються організаційні проблеми запровадження раніше розроблених інструментів боротьби за якість продукції. Але яким би досконалим не виглядав той чи інший стандарт чи навіть ціле сімейство інструментів, без досконалої системи менеджменту якості та кваліфікованого персоналу вони залишаться тільки папером. А от цій стороні справи в розглянутих роботах майже не приділяється уваги.

Метою даної роботи є запропонувати організаційну схему моніторингу втрат якості на базі використання стандарту IDEF0 та відомих інструментів, якими керуються японські менеджери для досягнення високої якості продукції.



Основний матеріал досліджень. В роботі [3, 4, 5] відмічається, що цикл життя продукції підприємства може розглядатися в двох аспектах, а саме як цикл життя товарної продукції та цикл життя конкретного виробу (рис. 1).

Рисунок 1– Два цикли життя продукту

На рис. 2 представлений цикл життя товарної продукції, який керується стратегічними планами товарної політики. Він починається з маркетингових досліджень і закінчується моральним старінням та зняттям продукції з виробництва.

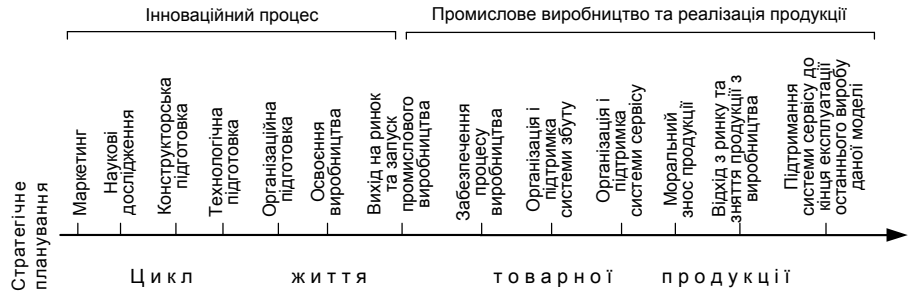


Рисунок 2– Цикл життя товарної продукції

А на рис. 3 показаний цикл життя конкретного виробу, що зійшов з конвеєра підприємства. Він починається із закупівлі сировини та матеріалів і закінчується фізичним зносом та утилізацією.

Основи якості продукції закладаються в циклі життя товарної продукції, на етапі інноваційного процесу. На етапі промислового виробництва та реалізації продукції має місце підтримка виробничих підрозділів та системи збуту, де є постійний зв'язок та вплив на цикл життя конкретного виробу. Але персонал підрозділів задіяних в циклі життя товарної продукції не мають прямого контакту з матеріалом та процесами його перетворення в деталі, механізми та машини.

Рисунок 3 – Цикл життя конкретного виробу

В циклі життя конкретного виробу вирізняються два основні періоди: період виготовлення виробу (має місце на підприємстві) та період експлуатації виробу (має місце у споживача продукції). На підприємстві робота ведеться згідно оперативно-календарного планування в трьох напрямах: закупівлі, виробництво та продаж (збут) продукції. Період експлуатації виробу проходить у споживача, але підприємство теж може приймати участь в його експлуатації, як то: доставка, монтаж, введення в експлуатацію, сервісне обслуговування, але це має місце в разі укладення відповідного контракту.

Наведені схеми циклів життя розкривають їх зміст в самих загальних рисах. Але для системної боротьби за якість цього замало, потрібна подальша декомпозиція системи.

За приклад декомпозиції вибираємо частину циклу життя товарної продукції, а саме блоку «Розробка виробу», куди входять позиції маркетингових досліджень, науково-дослідних робіт, розробки технічного завдання, конструкторської підготовки виробництва. Цей блок має вирішальне значення для зумовлення рівня якості виробу. Вплив маркетологів залежить від їх положення в організаційній структурі підприємства. В маркетингово-орієнтованому підприємстві роль маркетингового підрозділу надзвичайно висока. Саме тут розробляється концепція виробу, на базі якої проводяться всі подальші роботи. Для досягнення рівня виробу, обумовленого його маркетинговою концепцією, науково-дослідні підрозділи пропонують свої розробки, або ж починають проводити нові дослідження. А вже потім, виходячи з маркетингової концепції виробу, результатів науково-дослідних робіт (НДР) та можливостей технологічного потенціалу підприємства, розробляється технічне завдання, яке заміняє маркетингову концепцію. Якщо маркетингова концепція є скоріше відображенням товарної політики підприємства і заявою про наміри, то технічне завдання це є регламентуючий документ, де зафіксовані часові терміни виконання робіт, відповідальні за виконання цих термінів та за якість результатів робіт. Це комплексний документ, що враховує думки усіх задіяних підрозділів підприємства та споживачів.

Технічне завдання передається на позицію «Конструкторська підготовка виробництва» у відділ досвідно-конструкторських робіт (ДКР або КБ), де у відповідності з ним розробляється конструкторська документація. На цьому розробка виробу закінчується і конструкторська документація передається на наступну позицію «Технологічна підготовка». Конструкторська підготовка виробництва може проводитись в одній організації, а технологічна підготовка уже на промисловому підприємстві, яке визначене для виробництва даної продукції в масовому або серійному масштабах.

Ми зробили текстовий опис блоку «Розробка виробу», але графічне зображення декомпозиції цього блоку на базі стандарту IDEF0 є більш наглядним і інформативним.

Концептуально IDEF0 – це подання системи, що аналізується, у вигляді взаємодіючих блоків, які відображають процеси, операції та дії, що мають місце в даній системі [1, 6]. Все, що відбувається в системі і її елементах, називають функціями. Кожній функції відповідає блок, який на IDEF0-діаграмі представляється прямокутником. Всередині кожного блока розміщується його номер та ім'я, яке повинне бути дієсловом або дієприслівниковим зворотом. Тобто, розглянутий нами блок «Розробка виробу» в системі IDEF0 трансформується в блок «Розробити новий виріб». Як завжди в процесному підході, в так званому «чорному ящику», в даній термінології – блоку, зліва є вхід, справа вихід, зверху управління, що визначає умови, як досягти результату, знизу механізми, тобто все, за допомогою чого здійснюється перетворення входу у виходи. Стрілки між блоками показують які дані або матеріальні об'єкти повинні надійти на вхід наступного блоку.

Таким чином, стандарт IDEF0 є представлення діяльності організації як мережі процесів (функцій). При цьому така модель процесного подання організації повинна охоплювати усі складові життєвого циклу її продукції.

В самому загальному вигляді схема двох циклів життя (рис. 1) може бути представлена у вигляді прямокутника A0 (рис. 4), а цикл життя товарної продукції, як прямокутник A1, і цикл життя конкретного виробу, як A2. При подальшій декомпозиції цикл життя товарної продукції може бути представлений процесами A11, A12, A13 і т.д, а процеси циклу A2 відповідно як A21, A22, A23 і т.д. Для ще глибшої деталізації можна вводити процеси A121, A231 і т.д.

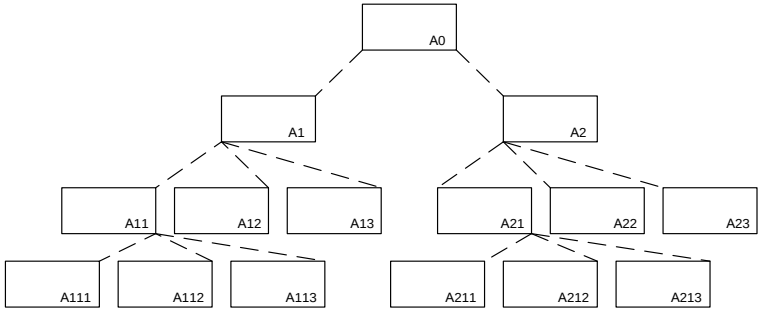


Рисунок 4 – Схема нумерації блоків

Для прикладу процесу декомпозиції розглянемо блок А11 «Розробити новий виріб», що є початковою частиною життєвого циклу товарної продукції – блоку А1. Блок А11 відображає укрупнений процес проектування виробу (рис. 5). З цього блоку видно які входи та виходи він має, що справляє управляючу дію на виконання функції, та які механізми при цьому задіяні.

Але цей блок досить багатоплановий, тому для кращого розуміння процесів, що в ньому мають місце, доцільно про вести декомпозицію, що й видно на тому ж рисунку – ланцюг блоків А111, А112, А113 та А114 у вигляді каскаду. В першому із них досить детально представлена функція маркетингу; в другому – науково-дослідна функція, що покликана створити нові продуктові та процесні технології; в третьому – затвердження технічного завдання на розробку технічної документації; в четвертому – виконання конструкторських робіт виготовлення конструкторської документації. Кожен із цих блоків значно більш деталізований, ніж блок А11.

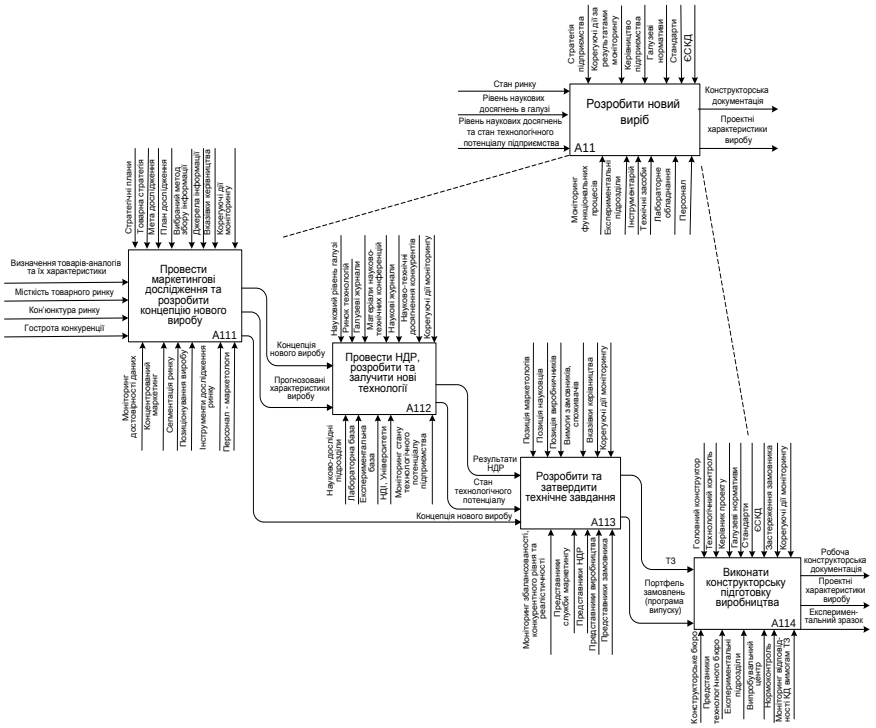


Рисунок 5 – Блок «Розробити новий виріб» в системі стандарту IDEF0

Аналогічно можна пройти по усьому блоку А1 та блоку А2.

Тепер знову повернімося до моніторингу втрат якості. Втрати якості, як і досягнення певного рівня якості, виникають тільки при виконанні процесів. Коли говориться про втрати якості, в нашій уяві відразу постає робітник з бракованою деталлю в руках. Але відомо [4], що рівень якості на 75% залежить від блоку розробки виробу, ще на 15% від підготовки виробництва і тільки на 10% від власне виробництва.

Власне виробництво характеризується показниками якості виготовлення продукції, якими є відповідність готового виробу вимогам нормативно-технічної документації, тобто стандартам, кресленням, специфікаціям. Виробництво не має права виходити за рамки цих вимог, навіть з метою підвищення певного показника, так як це може привести до підвищення собівартості продукції, або до зміни експлуатаційних характеристик, що може призвести до непередбачуваних наслідків. Тобто, для виробництва якісною є продукція, що цілком відповідає нормативно-технічній документації, а втратами якості є відхилення від вимог цієї документації. Ці втрати визначаються технічними замірами тих чи інших показників.

Що стосується 75% впливу на рівень якості розробників виробу. Етап розробки виробу має ключове значення тому, що саме тут визначається, чи вгадає підприємство в чому полягають очікування передбачуваної категорії споживачів, чи не помилися ми у виборі цієї категорії, чи здатні ми конкурувати на цьому ринку, якщо ні, то які наукові розробки необхідно розвивати, чи не запізнимося з виходом на обраний ринок і т.п. Якщо ми не вгадаємо з концепцією виробу, то подальші етапи мало що змінять. Продукція не матиме збуту, підприємство матиме дуже серйозні проблеми.

Виникає питання – а якого рівня якість потрібно закладати при розробці нового продукту? Оскільки це теж процес, де створюється майбутня цінність виробу для споживача, то в ньому поряд з цінністю створюються і втрати якості майбутнього продукту. Як оцінити дії маркетологів, науковців, конструкторів? Які їх втрати якості в їх функціональній діяльності?

Можна взяти за бажану планку рівня якості продукції твори відомих фантастів, адже багато з польотів їх фантастики уже втілені в життя, але в дечому реальні розробки їх уже випереджають. Все ж таки треба зізнатися, що перетворення фантастики в реальність є справою довготривалою і не для звичайних підприємств.

Інший варіант, залучати експертів із наукової сфери, щоб отримати підказку, в чому б ми змогли зробити прорив і різко піднести рівень якості продукції. Свого роду фантастика – от якби ми володіли оцими, уже існуючими в світі досягненнями, то могли б запропонувати свого роду ідеальну продукцію. Тоді заниження показників нашої продукції стосовно цієї ідеальної можна вважати втратою якості процесу розробки нового товару.

Між тим, ми тут припускаємось помилки. Так часто буває, що під якістю розуміють клас (рівень вимог, рівень якості), який можна встановити для продукції. Це неправильно. Продукція навіть тоді буде якісною, коли вона задовольняє певним, навіть обмеженим вимогам, при цьому бездоганно їм відповідаючи. Наприклад, і вершкове масло, і маргарин можуть бути однаково якісною продукцією. Кожний вид товару призначений для цільового використання і, відповідно, для певної категорії покупців. І якщо ці вироби задовольняють вимогам своїх споживачів, то вони є якісними.

Тобто, для однієї категорії споживачів можливо потрібно запозичити ідеї фантастів, для іншої створювати продукт такого рівня якості, який тільки можна створити, спираючись на новітні досягнення науки, комусь достатньо добротної техніки середнього рівня якості, а хтось згоден купити і дещо застарілу модель, яка справно працює і коштує недорого.

З цього витікає, що головна задача розробників нового виробу полягає у визначенні своїх можливостей, свого технологічного і маркетингового потенціалу і у відповідності до них вибирати категорію споживачів, так званий цільовий сегмент ринку. Саме на нього повинні орієнтуватись розробники нового продукту: вивчити ринок, конкурентів та їх продукцію, позиціонуватись, визначити ємність вибраного сегменту ринку та добре узнати побажання цієї категорії споживачів. На основі цього скласти рамочну концепцію нового виробу. Але треба пам’ятати, що проведення маркетингових досліджень це складний процес, якому властиві і критичні помилки. Це перший важливий крок, він за маркетологами. Для того, щоб задовольнити дану концепцію, необхідно мобілізувати ресурси наукових та технологічних підрозділів та підвищення технологічного потенціалу. Це другий важливий крок, він за науково-технічними працівниками. За результатами цих двох кроків скласти та затвердити амбіційне, але реалістичне технічне завдання – третій важливий крок, він за керівництвом підприємства. І нарешті конструктори створюють конструкторську документацію, а експериментальний цех випускає пробний зразок, який дасть остаточну відповідь – а що ж ми створили? – це четвертий важливий крок, він начебто і за конструкторами, а насправді це підсумковий результат роботи всієї команди розробників нового виробу.

Ми відмітили чотири важливих кроки. Але для кожного з перших трьох кроків, і особливо для маркетингу, неможливо визначити реперні показники, які були б ідеальними та досяжними і по відхиленню від яких можна було б сказати про втрати якості на цих етапах. Тобто і затверджене технічне завдання несе в собі помилки цих трьох кроків. І тільки четвертий крок має чітке завдання на проектування, а конструкторське бюро покаже свою ефективність після випробування експериментального зразка. Якщо результати випробування показали заданий результат, то значить на цьому

етапі втрат якості немає, якщо ж такі відхилення є, то є і втрати якості. Та на жаль це порівняння лише із технічним завданням, яке з великою вірогідністю несе в собі втрати якості на перших кроках.

Таким чином, ми, на жаль, практично не можемо напевно визначити наші втрати якості на етапі розробки нового виробу, другими словами – на скільки ми промахнулись в своїх прогнозах стосовно очікування ринку. Залишається сподіватися на кваліфікацію та інтуїцію маркетологів та керівництва організацією. Саме керівництву випадає відповідальна роль – дати добро на дуже витратну фазу інноваційного процесу – запуск у виробництво. І тільки вихід на ринок покаже, чи були допущені втрати якості на етапі розробки нового виробу. Та це вже буде запізно.

За систему менеджменту якості відповідають спеціалісти з якості. Але ж вони не можуть бути такими універсалами, щоб підказувати, як забезпечити якість на усіх без винятку процесах, що діють на підприємстві. Тому вони повинні діяти в тісній співпраці з відповідними професіоналами. Доцільно використовувати так звані сім інструментів контролю якості, що знайшли застосування в Японії. Одним з інструментів згаданої співпраці є створення діаграм Ісікави. На рис. 6 представлений приклад такої діаграми для блоку А111 «Провести маркетингові дослідження та розробити концепцію нового виробу».

Діаграма Ісікави будується для визначення всього спектру причин появи певної невідповідності, в даному випадку для визначення причин застаріння концепції виробу на момент його виходу на ринок. Таку діаграму можливо побудувати тільки із залученням як кращих спеціалістів-маркетологів, так і простих виконавців, а також спеціалістів зі сторони. Ця діаграма не зможе поліпшити справу з тим виробом, що вже спізнився з появою на ринку, але аналіз діаграми може виявити причини цього прикрого випадку, що послужить запобіганню подібної ситуації в майбутньому. За допомогою цієї діаграми можна виявити проблемні місця і проводити моніторинг втрат якості саме там.

На рис. 7 наведений приклад діаграми Ісікави для виробничого процесу з життєвого циклу 2 (конкретного виробу). Це аналіз появи відхилення від перпендикулярності зовнішньої поверхні кільця відносно його торців при без центровому шліфуванні. В даному випадку для розробки діаграми потрібно залучати технічних спеціалістів: технолога, робочого, майстра, начальника дільниці, звертатись до літератури. Для других відхилень необхідно розробляти інші діаграми Ісікави. Тобто, для однієї операції може бути побудовано декілька таких діаграм. Для виробничих процесів аналіз відхилень професіоналами за допомогою цих діаграм дає значно більш точний діагноз ніж, наприклад, для функцій розробки нового виробу.

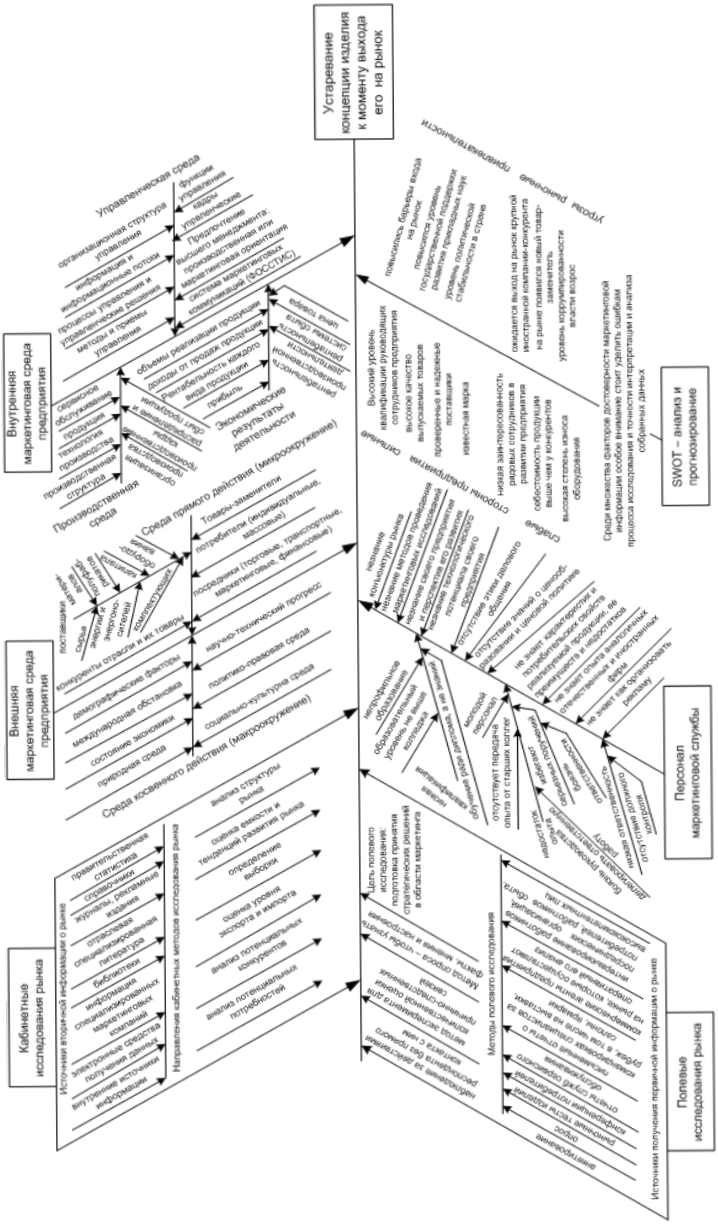


Рисунок 6 – Діаграма Ісікави для маркетингового блоку

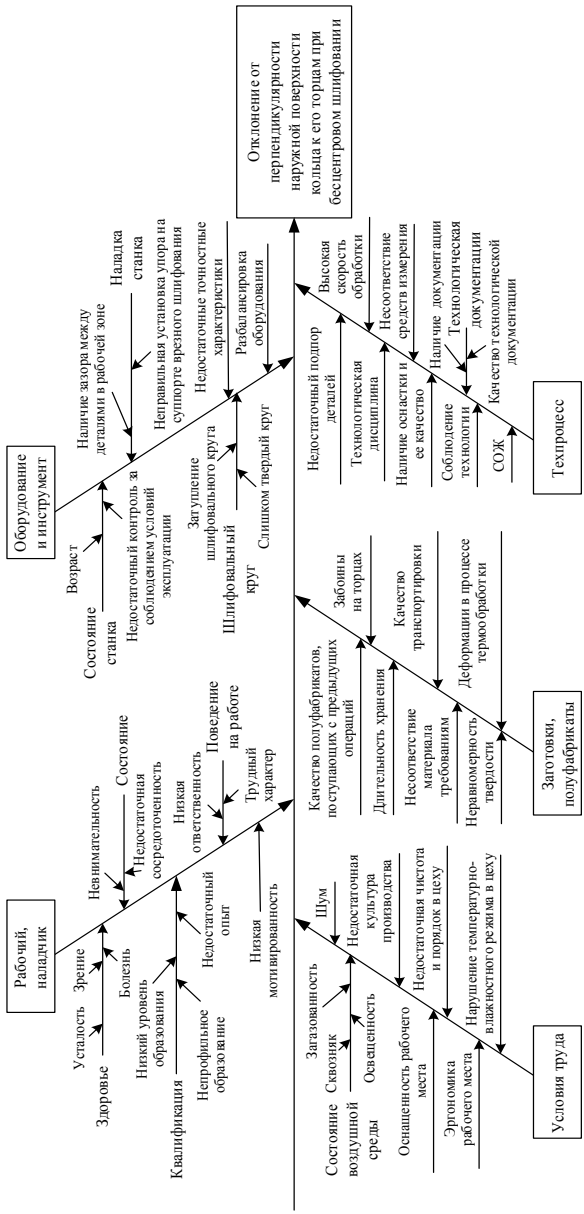


Рисунок 7 – Діаграма Ісікави для виробничого процесу

Кожній позиції на діаграмі Ісікави може бути визначений відсоток імовірної відповідальності за дане відхилення. За позиціями з найбільшим відсотком потрібно встановити моніторинг втрат якості.

Для моніторингу виробничих процесів доцільно застосувати контрольні карти (рис. 8). Вони відображають характер зміни показника якості в часі. При стійкому наближенні показника до критичного значення необхідно застосувати превентивні дії, відрегулювавши процес, знову ж таки за допомогою діаграми Ісікави та технічних інструкцій для конкретної операції.

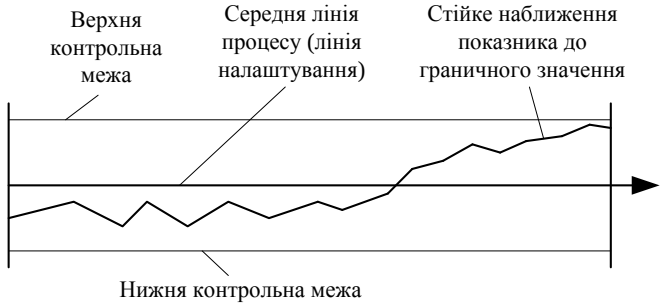


Рисунок 8 – Контрольна карта

Висновки по даному дослідженню і перспективи подальшого розвитку в даному напрямку. Застосування стандарту IDEF0 в комплекті з іншими інструментами забезпечення якості дає можливість переглянути усі функції (процеси) на протязі двох циклів життя продукту. Створюється деталізована документація для усіх операцій, що важливо як для заново створюваних систем менеджменту якості, так і для удосконалення уже існуючих систем. Це великий об’єм робіт, але він того вартий, так як усі функції, що існують на підприємстві постають проаналізованими досить детально, у тісному взаємозв’язку і взаємозалежності. Більш прозорими постають процеси формування цінності продукту для споживачів і місце та величина втрат цієї цінності внаслідок недосконалості процесів як з технічного, так і з організаційного боку.

Впровадження запропонованих заходів в двох циклах життя має свої відмінності.

Швидше можна побачити результат запровадження нововведень в менеджменті якості на виробничих операціях. На виробничих операціях неможливо підвищити цінність продукту вище закладеного в технічній документації. Зате виникає маса можливостей зниження цінності продукту за рахунок втрат якості продукту. Це може бути з вини постачальників, коли

надходять сировина та комплектуючі заниженої якості. Це також може бути занижена технологічна дисципліна. Можливо виною є зношеність верстата, або невірне його налаштування. Негативно позначаються також умови праці та безлад в цеху. Та й відношення робітників до роботи не завжди буває достатній мірі відповідальним, або йо кваліфікація не відповідає вимогам до виконання певної операції, або цьому заважає стан здоров'я. Тобто, в циклі життя конкретного виробу основну загрозу якості виробу складають втрати якості. Запропоновані заходи в менеджменті якості дозволять забезпечувати запланований рівень цінності продукту за рахунок усунення втрат якості.

В циклі життя товарної продукції складніше виявити втрати якості продукції, але в цьому циклі, особливо в блоці розробки виробу закладаються показники цінності товару для певної категорії споживачів. Щоб визначити цю цільову категорію споживачів потрібно досконало вивчити ринок, позиціонувати свій виріб на цьому ринку, визначити можливу кількість прихильних до нашого виробу потенційних покупців. Розробка маркетингової концепції виробу повинна бути націлена на якнайбільше задоволення потреб вибраного сегмента споживачів, що буде служити запорукою реалізації великих обсягів продукції. Тут переважує функція підвищення цінності виробу для споживача, а не втрат якості. При цьому треба пам'ятати, що товар є цінним для споживача, коли його якість відповідає його вимогам. Намагання перевершити цей рівень якості може бути доцільним тільки переході на обслуговуванні іншого, більш вимогливішого цільового сектору споживачів. Але всяке підвищення рівня якості вимагає і більш високої культури виробництва. А якщо технологічний потенціал підприємства не готовий забезпечити виготовлення продукції більш високого рівня якості, то можливі наступні наслідки: 1) переозброєння виробничих потужностей; 2) підвищення собівартості та ціни виробу; 3) нездатність виробництва підтримувати завищені для нього вимоги і як наслідок, великий рівень втрат якості, а то і просто непоправного браку. Це дуже відповідальна функція, від якої залежить саме існування підприємства. Запровадження пропонованих заходів має підняти якість виконуваних робіт, але результат буде ясним тільки після виходу продукції на ринок, коли витрачено багато коштів. Це переконує в необхідності удосконалювати систему менеджменту якості саме в цій доленосній функції.

Список використаних джерел: **1**. *Курьян, А.Г*. Реализация процессного подхода в рамках систем менеджмента качества на основе методологии функционального моделирования IDEF0 / *А.Г. Курьян, Д.С. Ярошевич, П.С. Серенков* // Автоматизация в промышленности. – 2003. – № 3. – С. 9–13. **2**. *Курьян, А.Г.* Потери качества и результативность менеджмента / *А.Г. Курьян, П.С. Серенков, Н.А. Рекуц* // Методы менеджмента качества. – 2004. – № 3. – С. 30–33. **3.** *Крыжный Г.К.* Качество и два цикла жизни продукции. Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків, НТУ "ХПІ", 2010. – Вип. 1 (20) – с. 107-117. **4**. *Крыжный Г.К.* Обеспечение качества продукции в двух циклах ее жизни. Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – Вип. 6 – с. 255 – 262.

5. *Крыжный Г.К.* Взаимосвязь двух циклов жизни и ее влияние на качество продукции. Високі технології в ма-шинобудуванні: Збірн. наукових праць НТУ "ХПІ". – Харків, 2012. – Вип.1 (22). – с. 153-160. **6**. Стандарт России З 50.1.028 – 2001. Методология функционального моделирования.

Bibliography (transliteratrated): 1. *Kur'jan, A.G.* Realizacija processnogo podhoda v ramkah sistem menedzhmenta kachestva na osnove metodologii funkcional'nogo modelirovanija IDEF0 / *A.G. Kur'jan, D.S. Jaroshevich, P.S. Serenkov* // Avtomatizacija v promyshlennosti. – 2003. – № 3. – S. 9–13. **2.** *Kur'jan, A.G.* Poteri kachestva i rezul'tativnost' menedzhmenta / *A.G. Kur'jan, P.S. Serenkov, N.A. Rekuc* // Metody menedzhmenta kachestva. – 2004. – № 3. – S. 30-33. **3.** *Kryzhnyj G.K.* Kachestvo i dva cikla zhizni produkcii. Visoki tehnologiï v mashinobuduvanni: zb. nauk. prac'. – Harkiv, NTU "HPI", 2010. – Vip. 1 (20) – s. 107-117. **4.** *Kryzhnyj G.K.* Obespechenie kachestva produkcii v dvuh ciklah ee zhizni. Suchasni tehnologiï v mashinobuduvanni: zb. nauk. prac'. – Harkiv: NTU «HPI», 2011. – Vip. 6 – s. 255 – 262. **5.** *Kryzhnyj G.K.* Vzaimosvjaz' dvuh ciklov zhizni i ee vlijanie na kachestvo produkcii. Visoki tehnologiï v ma-shinobuduvanni: Zbirn. naukovih prac' NTU "HPI". – Harkiv, 2012. – Vip.1 (22). – s. 153-160. **6.** Standart Rossii Z 50.1.028 – 2001. Metodologija funkcional'nogo modelirovanija.

УДК 338.34.1

Р.Ф. СМОЛОВИК, канд. экон. наук,
А.В. ФАДЕЕВ, канд. техн. наук, Харьков, Украина

АНАЛИЗ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЗНАЧИМОСТИ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОСТИНДУСТРИАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

У даній статті описується аналіз особливостей розвитку постіндустріального виробництва; значення інноваційних процесів, технологій з їх специфічними, унікальними властивостями, які знижують витрати на громадську безпеку; це потреба в соціально-економічній оцінки інтелектуальної праці як основи інноваційних процесів.
Ключові слова: постіндустріальне виробництво, інноваційні процеси

В данной статье описывается анализ особенностей развития постиндустриального производства; значение инновационных процессов, технологий с их специфическими, уникальными свойствами, которые снижают затраты на общественную безопасность; эта потребность в социально-экономической оценке интеллектуального труда как основы инновационных процессов.
Ключевые слова: постиндустриальное производство, инновационные процессы

This article describes the analysis of features of development of post-industrial production; the value of innovative processes, technologies, and their specific, unique properties that reduce costs to public safety; the needing for socio-economic assessment of intellectual labor as the basis of innovation processes.
Keywords: post-industrial production, of innovation processes

Вступление. В условиях индустриального промышленного производства любое промышленное предприятие, как открытая система внешнего и внутреннего окружения, представляет собой лишь замкнутый цикл переработки исходных ресурсов в готовый продукт. Вопросы организации такого процесса производства широко представлены в специальной литературе.

Основная часть. Постиндустриальное (инновационное) производство в отличие от указанного выше включает в свою сферу целый комплекс других видов производств от заготовительных до депроизводственных. Следовательно, представляет собой сложную систему, предъявляющую особые требования к качеству исходных ресурсов, средств труда, методам организации производства, реализации продукции, сервисному обслуживанию. Кроме того такое производство становится наиболее восприимчивым к техническим и организационным нововведениям, важнейшая роль в которых отводится инновационным процессам, поскольку они обладают циклическими свойствами.

Кроме того, инновационные процессы являются основой ресурсосберегающих и экологически чистых производств. Необходимо также отметить тот факт, что в современных условиях глобализации и кризисных

© Р.Ф. Смоловик, А.В. Фадеев, 2016

ситуаций качество товаров и услуг становится практически главным фактором самого существования предприятия в конкурентной рыночной среде.

Практический опыт хозяйственной деятельности стран с развитой экономикой позволяет сделать вывод, что в условиях кризисных ситуаций именно инновационные процессы способствуют решению актуальных задач выхода из кризиса, либо снижения его негативных последствий. В этих условиях глобализации экономических систем инновационная технологическая политика представляет собой основной источник обеспечения конкурентоспособности не только создаваемых товаров, услуг, но и предприятия в целом. Использование инновационных технологий, процессов позволяет предложить потребителю такие товары функциональные, эксплуатационные свойства которых имеют для потребителя решающее значение и которые отсутствуют у товаров-конкурентов.

К уникальным свойствам инновационных технологий можно отнести их способность в современных условиях глобализации обеспечивать:

- переход к инновационной, интеллектуальной экономике, главным признаком которой является производство товаров, услуг со значительным содержанием интеллектуального труда;
- значительное снижение затрат общественного труда в процессе изготовления средств и предметов труда;
- перераспределение трудовых ресурсов из сферы производства в сферу обслуживания, как на микро, так и на макроуровне;
- решение целого комплекса социальных задач.

Необходимо особо отметить, что из всей совокупности перечисленных особых свойств инновационных технологий главным является ее свойство обладать наибольшей по своей социально-экономической значимости общественной стоимостью, с помощью которой научные знания проникают во все сферы производства и обслуживания. Причем в этом процессе используются самые перспективные результаты фундаментальных исследований, открытий, изобретений.

Однако необходимо учитывать, что любая инновационная технология может представлять интерес для потенциального потребителя только в том случае, если удовлетворяет его определенную потребность, необходимую конкурентной среды рынка товаров, услуг.

Особо необходимо отметить способность инновационных технологий не только удовлетворять существующие потребности рынка, но и создавать принципиально новые рынки. Однако, с другой стороны именно такое свойство инновационных технологий создает для них качественные условия с точки зрения их восприятия рынком.

Очень часто именно инновационные идеи и базирующиеся на их основе технологии, остаются невостребованными, несмотря на свои уникальные

социально-экономические преимущества. В связи с этим ещё более сложной становится проблема количественной оценки их социально-экономической значимости. Зачастую такая количественная оценка может быть сформулирована лишь косвенно, если она позволяет найти возможные пути количественного измерения роста производительности общественного труда, снижения затрат живого труда (трудоемкости) и прошлого (материалоемкости).

Кроме того необходимо учитывать, что финансовые и другие виды ресурсов, затрачиваемые на приобретение, разработку инновационных технологий, могут быть ничтожно малы по сравнению с тем потенциальным социально-экономическим эффектом, который заложен в них и может быть получен в будущем периоде.

Поскольку социально-экономическая ценность, значимость инновационных процессов, технологий можно выразить количественно только после их фактической апробации непосредственно у потребителя, то и спрос на них будет в значительной степени зависеть от представлений, соображений потребителей об уровне полезности приобретения тех научно-технических знаний, на которых базируются новые технологии, конкретные технологические новшества.

Сам же процесс предложения научно-технических знаний тоже базируется на особых правилах, условиях, совершенно отличительных от тех, в условиях которых работает закон спроса и предложения на готовые средства и предметы труда, и в которых реализованы научно-технические знания.

Таким образом можно сделать вывод, что сложность процесса количественной социально-экономической оценки инновационных процессов, технологий взаимосвязана с действием тех же самых факторов, которые имеют место в процессе определения количественных показателей, определяющих затраты интеллектуального труда, обеспечивающего появление инновационных технологий, процессов. Необходимо также учитывать, что инновации, основанные на новых знаниях обладают наиболее длительным временным лагом лет, от появления инновационной идеи до реализации ее в виде готовых продуктов и самым длительным сроком окупаемости затрат на их разработку. Кроме того для процесса их разработки и реализации характерен высокий уровень риска.

Таким образом возникает необходимость анализировать социально-экономическую сущность инновационных процессов с учетом значительной степени неопределенности, риска получения желаемых положительных результатов практического использования инновационных знаний, идей, технологий, процессов.

Однако даже в этих условиях следует учитывать необходимость изучения потенциальных возможностей развития инновационных технологий, поскольку инвестиции в базовые технологии, как показывает практика, позволяют лишь в незначительной степени улучшить качественные

характеристики товаров. В связи с этим они не во всех случаях способны решать задачи формирования уровня качества как показателя жизнеспособности государства в целом. Кроме того, условия глобализации приводят к некоторому реформированию самого содержания понятия качества. Главное его содержание — соответствие требованиям потребителя. Качество, как интегральный показатель трудовых затрат и времени необходимых для изготовления продукции, становится главным элементом в достижении стратегических целей предприятия (рис. 1) и позволяет с глобальной точки зрения определить социально-экономическую сущность понятия качества как систему жизнеобеспечения, жизнеспособности каждой страны в целом.

В этих условиях возникает необходимость учитывать международные нормативные, законодательные документы, касающиеся ответственности за ущерб, наносимый как окружающей среде, так и конкретному потребителю. Следовательно, в современных условиях кризисной ситуации необходима разработка комплексной государственной программы, которая учитывала бы интересы всех субъектов хозяйственной деятельности: предприятий, организаций, изготовителей и потребителей товаров и услуг, инвесторов, социальных институтов. Причем, необходимо учитывать, что каждый из субъектов имеет свои собственные цели, исходя из которых решает задачи в своей конкретной области.

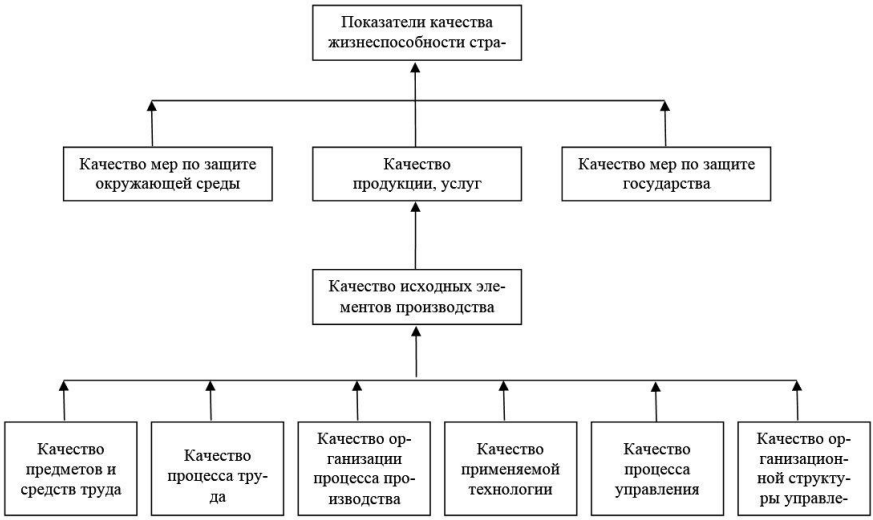


Рисунок 1 – Показатели формирования качества жизнеспособности страны

Однако мы отчетливо понимаем, что решение задач кризисных ситуаций не ограничивается значительными инвестициями в инновационные технологии. Известно, что эффективность процесса производства только на одну треть зависит от инноваций в средства труда, а большая ее часть определяется интеллектуальным потенциалом трудовых ресурсов, квалификацией, компетентностью менеджмента, его способностью использовать базовые концепции управления, а также умением разрабатывать принципиально новые подходы, исходя из стратегии предприятия и изменяющихся условий внешнего и внутреннего окружения. Причем, необходимо учитывать, что сложившиеся ранее в менеджменте представления и методы управления могут превратиться в непреодолимые препятствия в достижении поставленных целей и решении задач, за которые менеджмент становится лично ответственным.

В этих условиях большое значение, на наш взгляд, имеет стратегический прогноз таких социально-психологических составляющих элементов инновационного развития как: повышение способности трудовых ресурсов предприятий, организаций к восприятию изменений, инновационных процессов, к их внедрению; их инновационного подхода ко всей системе хозяйственной и финансовой деятельности.

Интеллектуальные способности трудовых ресурсов предприятия, организации обладают разными свойствами, одно из которых - быть источником повышения эффективности производственной деятельности за счет комбинации различных элементов инновационного потенциала : научно-технического, производственного, управленческого и и других. В связи с этим возникает необходимость анализа условий инновационного развития ведущих отраслей промышленности, отдельных предприятий, научно-исследовательских организаций. Причем решать указанную задачу необходимо с учетом условий современного экономического кризиса, снижения производительности общественного труда, кредитной политики национального банка и падения курса национальной валюты.

Выводы. Все изложенное выше позволяет сделать следующие выводы. Особенности функционирования потребности рынка товаров, услуг, базирующихся на инновационных технологиях, основанных на научно-технических знаниях, вызывают необходимость совершенствования подхода к количественному измерению затрат на их производство и соответствующей оценки их эффективности.

При выведении традиционных товаров на рынок удовлетворяется уже известный на данный товар спрос потребителя. Инновационные технологии, основанные на научно-технических знаниях, работающие не на спрос, а на предложение, способны создавать не только новые средства, предметы труда, но и новые рынки.

Однако стоимость научного интеллектуального труда, используемого в

процессе разработки, реализации инновационных идей, продуктов сложно пока еще определяется количественно, относительно заложенного в них потенциального социально-экономического эффекта.

Важнейшим условием выхода страны из кризисной ситуации является инновационная активность, способствующая обновлению капитала, развитию средств производства и росту занятости населения. Однако процесс развития инновационной деятельности в значительной степени зависит от наличия и уровня интеллектуального потенциала трудовых ресурсов, так как организация работы персонала должна соответствовать стратегической концепции развития предприятия, организации, В связи с этим необходима комплексная программа антикризисных мер, обеспеченная финансовыми инвестициями. В процессе разработки данной программы большое значение на макроуровне имеет анализ производственного потенциала и инновационной политики.

Список использованных источников: 1. *В.В. Гринев, В.А. Гусев* Инноватика. Харьков Институт монокристаллов. 2004 с 460. **2.** *А.И. Грабченко, В.Г. Перерва, Р.Ф. Смоловик* Основы маркетинга высоких технологий. Харьков 1999 с 240 **3.** *А.М Бандурка* и др.Технологическая инновационная деятельность. Менеджерский аспект. Харьков 2004 с 304.

Bibliography (transliteratrated): 1. *V.V. Grinev, V.A. Gusev* Innovatika. Har'kov Institut monokristallov. 2004 s 460. **2.** *A.N. Grabchenko, V.G. Pererva, R.F. Smolovik* Osnovy marketinga vysokih tehnologij. Har'kov 1999 s 240 **3.** *A.M Bandurka* i dr.Tehnologicheskaja innovacionnaja dejatel'nost'. Menedzherskij aspekt. Har'kov 2004 s 304.

УДК 004.376

О.Є. ЯКОВЕНКО, канд. техн. наук,
П.С. НОСОВ, канд. техн. наук,
М.С. САФОНОВ, Херсон, Україна

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ АСИСТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ НАВЧАННЯ ОСІБ З ОСОБЛИВИМИ ПОТРЕБАМИ

У статті розглянуті особливості розробки інформаційної асистивної технології навчання осіб з особливими потребами.
Ключові слова: інформаційна асистивна технологія, навчання, особи з особливими потребами

В статье рассмотрены особенности разработки информационной ассистивной технологии обучения лиц с особыми потребностями.
Ключевые слова: информационная ассистивная технология, обучение, лица с особыми потребностями

The article describes the features of the development of assistive information technology training for people with special needs.
Keywords: assistive information technology, training, people with special needs

Вступ. До порушень опорно-рухового апарату (ОРА) відносять поліомієліт, дитячий церебральний параліч, ампутацію кінцівок, хребтово-спинальну травму та інше. У таких людей низька самооцінка, відношення до людей суперечливе. З одного боку, їм властива емоційна незрілість, з іншою - їх обтяжує положення опікуваних.

Враховуючи це, важливо надати людям з відхиленнями у розвитку системи спеціальної освіти, її форм і змісту, введення нових педагогічних підходів і інноваційних технологій [11], психологічного супроводу навчального процесу, а також нових комплексних програм розвитку особистості і її найбільш ефективної і оптимальної соціально - трудової адаптації.

Саме на вирішення вказаних вище питань спрямована програма підготовки людей з вадами психофізичного розвитку до навчання за допомогою інформаційної асистивної технології (ІАТ).

Мета роботи. Створення оптимальних умов для досягнення соціальної зрілості кожною особистістю, розвиток тих здібностей, які потрібні їй і суспільству, досягнення певного рівня освіченості, використовуючи потенціал компенсаторно-корекційних можливостей, включення її в соціально-вартісну активну діяльність, забезпечення тих знань, умінь та навичок, рис характеру, які уможливлюють її нормальне життя в соціумі.

Основна частина роботи. Одним з рішень даної проблеми є розробка системи управління поглядом без задіяння кінцівок. Все частіше винахідники знаходять ідеї управління поглядом у більш життєвому застосуванні.

© ***О.Є. Яковенко, П.С. Носов, М.С. Сафонов, 2016***

Наприклад фахівці з Сент-Ендрюського університету в Шотландії розробили систему Diff Displays, що стежить за тим, щоб людина не відволікалася від роботи. Diff Displays використовує камеру, яка використовує алгоритм комп'ютерного зору для виявлення траєкторії руху очей користувача.

Одним з лідерів на ринку систем Eye tracking є компанія Tobii (Швеція). Її апаратно-програмні засоби використовую інфрачервоне випромінювання, невидиме для людини. Датчики відстежують напрям погляду користувача, дозволяючи виконувати певні операції рухом очей [1-4]. Використання цієї технології дозволить підключити апаратну складову для сповіщення і управління навколишніми автоматизованими об'єктами життєдіяльності за типом "Розумний дім" з метою підвищення комфорту і рівня безпеки осіб з порушеннями опорно-рухового апарату.

Але використання таких технологій вимагає особливих вимог до проектування програмних інтерфейсів інформаційних систем, через концентрацію уваги на певній частині екрану [12, 13].

Недоліками цих технологій є:

- складність розрізнення напрямку погляду в керуючій позиції з метою віддачі команди і мимовільного напрямку погляду в ту ж позицію (проблема «дотик Мідаса»);

- необхідність забезпечити значну кутову відстань між керуючими позиціями у зв'язку з порівняно низьким просторовим дозволом цієї технології (наприклад, в порівнянні з точністю позиціонування курсору за допомогою комп'ютерної миші) [6-8];

- необхідність високої точності роботи системи відстеження напрямку погляду, для забезпечення якої потрібне індивідуальне налаштування і може вимагатися забезпечення додаткового підстроювання в процесі експлуатації з використанням калібрувальних процедур, що створюють для користувача додаткове навантаження і тимчасові витрати [9].

Через те, що засоби Eye tracking визначають позицію погляду з певною похибкою – потрібно в драйвері передбачити функцію встановлення спеціалізованих мертвих зон [10]. Дані зони згладжували б коливання координат погляду та робили б переміщення курсору більш плавним. Плавне переміщення можна організувати за допомогою повільних зон, при встановленні погляду на які, курсор би не зразу переміщувався, а тільки через певний час фокусування.

На рис. 1 представлена схема переміщення курсору миші, при зміні координат погляду. На даній схемі видно, що номери позицій погляду від 1 до 3 знаходяться в одній мертвій зоні і це не дозволяє рухатись курсору. При переміщення до 4-ї координати – курсор моментально переміщується до неї, вповільняючись лише на повільній зоні. П’ята координата знаходиться в новій мертвій зоні і це також не дає курсору рухатись.

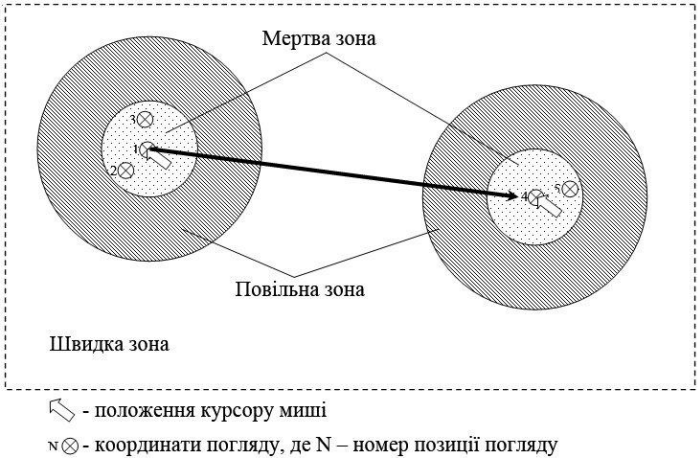


Рисунок 1 – Залежність переміщення курсору від координат погляду

Такий підхід дозволяє уникнути зайвого переміщеня та тремтіня курсору, що значно відволікає користувача. Таким чином, визначення розміру мертвих та повільних зон є основним завданням при адаптації користувача до системи з використанням засобів Eye tracking.

Програмна оболонка системи зв'язується з платою Master по інтерфейсу RS - 485 з підключеним протоколом Modbus. До плати Master підключені вимірювальні датчики (температури, вологості, освітленості, CO2). Датчики можуть бути підключені як безпосередньо до плати Master, так і до окремої плати Slave (плата Slave потрібна для організації ланцюга з датчиків для кожної кімнати).

Для організації двопровідної лінії зв'язку в напівдуплексному режимі і підключення пристрою до ПК зібраний перетворювач USB to RS - 485. Загальний вигляд взаємодії програмної і апаратної частини управління "Розумним домом" засобами TOBII Eye tracking представлений на рис. 2.

Управління мережевими побутовими приладами (чи будь-якого іншого навантаження) здійснює силовий блок. Блок є набором реле (при цьому силовий блок має бути представлений в окремому корпусі, наприклад в розподільній коробці). Реле розраховані для навантаження максимум в 10A ~250V AC або ж постійного струму в 30V DC 10A. Силовий блок також має зовнішню світлодіодну індикацію, для швидкого контролю ввімкненого/вимкненого мережевого навантаження.

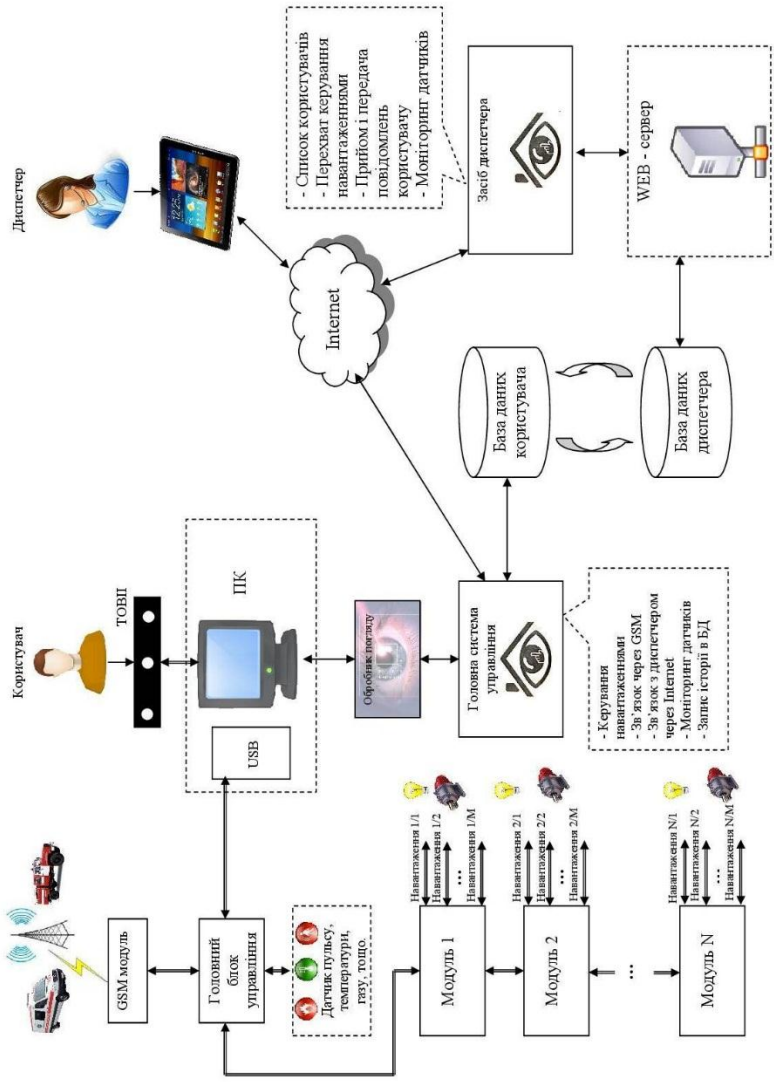


Рисунок 2 – Загальний вигляд взаємодії програмної і апаратної частини управління "Розумним домом" засобами TOBII Eye tracking

У системі також використовується GSM модуль, який потрібний для виклику екстрених служб у разі виникнення аварійних ситуацій (пожежа, витік газу, потоп). Також є можливість використати цей модуль в якості видаленого управління (примусового управління мережевими приладами і іншими) [14]. Оскільки цей модуль представляє з себе практично мобільний телефон, на нього можна здійснити телефонний дзвінок. Це зручно якщо у клієнта виникли проблеми з системою і приміром сервісна служба може подзвонити прямо на пристрій і дати необхідні консультації (також за допомогою модуля можна прослухати що відбувається в кімнаті де розташована панель управління).

Система має свій власний ЖК індикатор, на якому відображені усі контрольовані параметри приміщення (окрім програмного забезпечення) і інші системні повідомлення. Підключення індикатора організовано за допомогою I2C інтерфейсу для економії портів мікроконтроллера.

Для того, щоб система могла відправляти аварійні і інші сполучення з точним часом їх походження в системі будуть організовані годинник реального часу (RTC). Є три варіанти організації цієї можливості, на внутрішньому таймері мікроконтроллера (що може сильно навантажувати контроллер), прочитувати час з GSM модуля або ж за допомогою окремої мікросхеми ds1307.

Як мікроконтроллер використовується контроллер AVR серії. На даний момент це ATMEGA644P в TQFP планарном корпусі (контроллер може бути змінений, оскільки можливо знадобиться контроллер з двома UART, один для із зв'язку з GSM модулем, а другий для підключення пристрою до ПК).

Висновки. Люди з обмеженнями життєдіяльності, використовуючи сучасні інформаційно-комунікаційні та Інтернет - технології можуть дистанційно навчатись, отримати професійну освіту з метою самореалізації та інтеграції у суспільство. Проте наповнення системи дистанційної освіти спеціальним психолого-педагогічним змістом відповідно до специфічних потреб таких людей, адаптування програмно-методичного комплексу дистанційного навчання до осіб з інвалідністю є нагальної проблемою, яку ми маємо вирішити на шляху до реальної дистанційної освіти людей з особливими потребами.

Виконаний підбір елементної бази для створення устаткування системи підтримки життєдіяльності осіб з порушеннями опорно-рухового апарату, що дозволить підвищити рівень комфорту і безпеки і забезпечити виконання поставлених цілей дослідження. Подальші розробки відноситимуться до безпосереднього створення апаратної частини системи, її тестування, аналізу працездатності і дій, що коригують, по поліпшенню її працездатності і надійності технічного рішення.

Список використаних джерел: 1. *Andrew Duchowski*. Eye Tracking Methodology, theory and Practice. British Library, London 2007. Clemson University – 321 p., SC 2934. ISBN 978-1-84628-608-7. **2.** *Duchowski, A. T., Medlin, E., Gramopadhye, A., Melloy, B.,* &Nair, S. (2001). Binocular eye tracking in VR for visual inspection training. In Virtual reality software & technology (VRST).New York: ACM Press. / Material in this paper is condensed from Duchowski (2003), adapted with permission. This work was supported in part by University Innovation Grant 1-20-1906-51-4037, NASA Ames Task NCC 2-1114, and NSF CAREER Award IIS-9984278. **3.** *Goldberg, J. H., Stimson, M. J., Lewnstein, M., Scott, N., &Wichansky, A. M.* (2002). Eye tracking in Web search tasks: Design implications. In Proceedings of the symposium, on eye tracking research & applications (ETRA) 2002 (pp. 51–58). New York: ACM Press. **4.** *Loschky, L. C., &McConkie, G. W*. (2000). User performance with gaze contingent multiresolutional displays. In Proceedings of the symposium on eye tracking research and applications (ETRA) 2000 (pp. 97–103). New York: ACM Press. **5.** *Bing Pan*. The determinants of web page viewing behavior: an eye-tracking study. ETRA '04 Proceedings of the 2004 symposium on Eye tracking research & applications Pages 147-154 ACM New York, NY, USA – 2004. **6.** *Lori Lorigo1, Maya Haridasan1, Hrönn Brynjarsdóttir1, Ling Xia1, Thorsten Joachims, Geri Gay, Laura Granka, Fabio Pellacini and Bing Pan*. Eye tracking and online search: Lessons learned and challenges ahead. Journal of the American Society for Information Science and Technology. Volume 59, Issue 7, pages 1041–1052, May 2008. **7.** Wearable Writing. Enriching Student Peer Review With Point-of-View Video Feedback Using Google Glass University of Minnesota Twin Cities, Minneapolis, MN, pages 231–237. USA - 2015. **8.** *Kenneth Holmqvist, Marcus Nyström, Richard Andersson, Richard Dewhurst, Halszka Jarodzka, Joost van de Weijer* Eye Tracking. A comprehensive guide to methods and measures. OUP Oxford, 2011. 560 p. **9.** *Jennifer Romano Bergstrom, Andrew Schall* Elsevier Eye Tracking in User Experience Design, 2014, USA - 400 p. **10.** *Mike Horsley, Natasha Toon, Bruce Knight, Ronan Reilly*. Current Trends in Eye Tracking Research. Springer Science & Business Media, 2013 USA - 345 p. **11.** *Яковенко О.Є., Носов П.С., Яковенко Є.О.*. Інформаційна асистивна технологія навчання осіб з порушенням опорно-рухального апарату // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві. Збірник наукових праць [Текст]. — Вип. 4(11) — Херсон: СТАР, 2015, С. 92-98. **12.** *Нарожний О.В., Сафонов М.С., Лук'янчук Ю.В.* Особливості проектування програмних інтерфейсів для осіб з порушенням опорно-рухального апарату в умовах використання засобів EYE TRACKING // Сучасні інформаційні технології 2016 (МІТ-2016): Матеріали шостої міжнародної конференції студентів і молодих науковців, ОНПУ. – Одеса, ВМВ, 2016. – С. 25-26. **13.** *Яковенко О.Є., Цобров В.В., Щербаков* Д.М. Підходи щодо створення інформаційної асистивної технології навчання осіб з порушенням опорно-рухального апарату засобами TOBII-X EYE TRACKER // Сучасні інформаційні технології 2016 (МІТ-2016): Матеріали шостої міжнародної конференції студентів і молодих науковців, ОНПУ. – Одеса, ВМВ, 2016. – С. 118-119. 14. *Носов П.С., Баранецкий Е.В., Свириденко А.Н*. Разработка аппаратных средств контроля жизнеобеспечения лиц с нарушениями опорно-двигательного аппарата // Сучасні інформаційні технології 2016 (МІТ-2016): Матеріали шостої міжнародної конференції студентів і молодих науковців, ОНПУ. – Одеса, ВМВ, 2016. – С. 135-136.

Bibliography (transliteratrated): 1. *Andrew Duchowski*. Eye Tracking Methodology, theory and Practice. British Library, London 2007. Clemson University – 321 p., SC 2934. ISBN 978-1-84628-608-7. **2.** *Duchowski, A. T., Medlin, E., Gramopadhye, A., Melloy, B., &Nair,* S. (2001). Binocular eye tracking in VR for visual inspection training. In Virtual reality software & technology (VRST).New York: ACM Press. / Material in this paper is condensed from Duchowski (2003), adapted with permission. This work was supported in part by University Innovation Grant 1-20-1906-51-4037, NASA Ames Task NCC 2-1114, and NSF CAREER Award IIS-9984278. **3.** Goldberg, J. H., Stimson, M. J., Lewnstein, M., Scott, N., &Wichansky, A. M. (2002). Eye tracking in Web search tasks: Design implications. In Proceedings of the symposium, on eye tracking research & applications (ETRA) 2002 (pp. 51–58). New York: ACM Press. **4.** *Loschky, L. C., &McConkie, G. W*. (2000). User performance with gaze contingent multiresolutional displays. In Proceedings of the symposium on eye tracking research and applications (ETRA) 2000 (pp. 97–103). New York: ACM Press. **5.** *Bing Pan*. The

determinants of web page viewing behavior: an eye-tracking study. ETRA '04 Proceedings of the 2004 symposium on Eye tracking research & applications Pages 147-154 ACM New York, NY, USA – 2004. **6.** *Lori Lorigo1, Maya Haridasan1, Hrönn Brynjarsdóttir1, Ling Xia1, Thorsten Joachims, Geri Gay, Laura Granka, Fabio Pellacini and Bing Pan*. Eye tracking and online search: Lessons learned and challenges ahead. Journal of the American Society for Information Science and Technology. Volume 59, Issue 7, pages 1041–1052, May 2008. **7.** Wearable Writing. Enriching Student Peer Review With Point-of-View Video Feedback Using Google Glass University of Minnesota Twin Cities, Minneapolis, MN, pages 231–237. USA - 2015. **8.** *Kenneth Holmqvist, Marcus Nyström, Richard Andersson, Richard Dewhurst, Halszka Jarodzka, Joost van de Weijer* Eye Tracking. A comprehensive guide to methods and measures. OUP Oxford, 2011. 560 p. **9.** *Jennifer Romano Bergstrom, Andrew Schall* Elsevier Eye Tracking in User Experience Design, 2014, USA - 400 p. **10.** *Mike Horsley, Natasha Toon, Bruce Knight, Ronan Reilly*. Current Trends in Eye Tracking Research. Springer Science & Business Media, 2013 USA - 345 p. **11.** *Jakovenko O.Є., Nosov P.S., Jakovenko* Є.O.. Informacijna asistivna tehnologija navchannja osib z porushennjam oporno-ruhal'nogo aparatu // Informacijni tehnologiї v osviti, nauci ta virobnictvi. Zbirnik naukovih prac' [Tekst]. — Vip. 4(11) — Herson: STAR, 2015, S. 92-98. **12.** *Narozhnij O.V., Safonov M.S., Luk'janchuk Ju.V.* Osoblivosti proektuvannja programnih interfejsiv dlja osib z porushennjam oporno-ruhal'nogo aparatu v umovah vikoristannja zasobiv EYE TRACKING // Suchasni informacijni tehnologiї 2016 (MIT-2016): Materiali shostoї mizhnarodnoї konferenciї studentiv i molodih naukovciv, ONPU. – Odesa, VMV, 2016. – S. 25-26. **13.** *Jakovenko O.Є., Cobrov V.V., Shherbakov D.M. Pidhodi* shhodo stvorennja informacijnoї asistivnoї tehnologiї navchannja osib z porushennjam oporno-ruhal'nogo aparatu zasobami TOBII-H EYE TRACKER // Suchasni informacijni tehnologiї 2016 (MIT-2016): Materiali shostoї mizhnarodnoї konferenciї studentiv i molodih naukovciv, ONPU. – Odesa, VMV, 2016. – S. 118-119. **14.** *Nosov P.S., Baraneckij E.V., Sviridenko A.N*. Razrabotka apparatnyh sredstv kontrolja zhizneobespechenija lic s narushenijami oporno-dvigatel'nogo apparata // Suchasni informacijni tehnologiї 2016 (MIT-2016): Materiali shostoї mizhnarodnoї konferenciї studentiv i molodih naukovciv, ONPU. – Odesa, VMV, 2016. – S. 135-136.

ЗМІСТ

ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

Внуков Ю.Н., ***Дядя С.И.***, ***Козлова Е.Б.*** Эволюция развития исследований сил при цилиндрическом фрезеровании от статических к динамическим условиям обработки (часть 1) 3

Внуков Ю.Н., ***Дядя С.И.***, ***Козлова Е.Б.*** Эволюция развития исследований сил при цилиндрическом фрезеровании от статических к динамическим условиям обработки (часть 2) 20

Гурей І.В., Гурей В.І. Теоретичне визначення термонапруженого стану під час фрикційного зміцнення 42

Kuchugurov M.V., Zubarev A.E., Chernovol N.N. Research of the possibility of self-excited vibrations amplitude reducing when turning by the variation of the cutting speed 49

Пыжов И.Н., Федорович В.А., Клименко В.Г. 3D моделирование напряженно-деформированного состояния при изготовлении алмазных карандашей 56

Якимов А.А., Тонконогий В.М., Бовнегра Л.В., Тигарев В.М. Расширение возможности использования прерывистых шлифовальных кругов на керамической связке 64

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

Антонюк В.С., Яценко І.В., ***Кириченко О.В.***, ***Ващенко В.А.*** Підвищення фізико-механічних параметрів елементів з оптичних керамік фінішною електронно-променевою обробкою 74

Гаращенко Я.Н., Крыжный Г.К., Попов А.И., Белый Е.Г. Разработка конструкции имплантата позвонка грудного отдела позвоночника с применением углерод-углеродного композита 87

Гусарев В.С. ГПС и алгоритм функционирования 96

Довгополов А.Ю., Некрасов С.С. Роз'ємні з'єднаня деталей, виготовлених з вуглепластику 102

Коновалов И.П. Структура технологических операций резки листа – ядро математической модели САПР раскроя 110

Криворучко Д.В., Сохань С.В., Холявка С.П., Ємельяненко С.С., Мельнік-Кагляк Н.О. Аналіз напружено-деформованого стану двошарової головки ендопротезу кульшового суглобу людини 122

Лищенко Н.В. Определение интенсивности зубошлифования на основе аналитического уравнения эвольвенты 137

Лищенко Н.В., Ларшин В.П., Ковальчук А.Н. Определение производительности профильного шлифования на станке с ЧПУ 150

Мельник-Кагляк Н.О., Сохань С.В. Наукові передумови алмазного шліфування тонкостінної оболонки з кераміки або сапфіру для виготовлення багатошарової головки протезу кульшового суглобу людини 163

Мицык А.В., Федорович В.А. Аналитика, комментарии и классификация технологий отделочно-зачистной виброобработки, созданных комбинированием различных схем энергетического воздействия 175

Ступницький В.В., Кук А.М. Математична модель аналізу корозійної стійкості поверхонь виробу з врахуванням технологічних чинників 190

Турманидзе Р.С. Повышение эксплуатационных характеристик мощных ветровых станций путем использования роторов с изменяемыми параметрами в динамике и эффективный метод аккумуляции ветровой и солнечной энергии 197

Федорович В.А., Залога В.А., Пыжов И.Н., Криворучко Д.В., Федоренко Д.В. Методология 3D моделирования процессов обработки труднообрабатываемых материалов 208

Шейко М.М., Скок В.М. Формування алмазно-гальванічного покриття з протекцією алмазним мікропорошком в правячому інструменті 233

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ

Ваниев Э.Р., Джемилов Э.Ш., Алиев А.И., Бекиров Э.Л. Влияние режимов упрочняющей приработки на стойкость инструмента при фрезеровании стали 12Х18Н10Т с использованием различных СОТС 245

Залога В.О., Яшина Т.В., Динник О.Д. Управління якістю виробничих процесів машинобудівного підприємства на основі аналізу вимірювальних систем 253

Набока Е.В., Колесник М.Э. Применение международных стандартов на этапе интеграции процесса управления качества с процессом конструкторско-технологической подготовки производства 259

Оргиян А.А., Творищук И.М., Баланюк А.В. Технологическая динамика подрезки сплошных и прерывистых торцов 264

Руднев А.В. Инжиниринг качества шлифования лезвийных инструментов из АТПМ 276

ЕКОНОМІКА ТА ОСВІТА

Зубкова Н.В., Доля В.М. Підготовка фахівців спеціалізації «Інструментальне виробництво» в НТУ «ХПІ» 281

Кремнев Г.П., Оргиян А.А. Особенности совершенствования подготовки бакалавров и магистров 286

Крижний Г.К., Козакова Н.В., Норік Е.В. Організація менеджменту якості на базі стандарту IDEF0 на виробничому підприємстві 294

Смоловик Р.Ф., Фадеев А.В. Анализ социально-экономической значимости инновационных процессов постиндустриального производства 308

Яковенко О.Є., Носов П.С., Сафонов М.С. Особливості розробки інформаційної асистивної технології навчання осіб з особливими потребами 314

Науково-виробниче видання

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ
В МАШИНОБУДУВАННІ

Збірник наукових праць
Українською, російською та англійською мовами

Випуск 11

Відповідальний за випуск: проф. *В. О. Федорович*

Матеріали відтворено з авторських оригіналів

Підп. до друку Формат 70×100 1/16. Папір офісний.
RISO-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 20,0.
Наклад 300 прим. Зам. № ____

Видавничий центр НТУ «ХПІ».
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21