

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 10

ХАРКІВ НТУ «ХПІ» – 2015 – 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),
М. В. Верезуб, 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, М. Раджаб Заде

*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. 10 / редкол.: В. О. Федорович (голова) [та ін.]. – Харків :
НТУ «ХПІ», 2015. – 343 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 та екології. Викладено сучасні аспекти і тенденції удосконалювання технологій обробки, конструювання інструменту та обладнання, моделювання процесів, 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 Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)

ББК 34.63

© Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», 2015

ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

УДК 621.914.1

Ю.Н. ВНУКОВ, д-р техн. наук, **А.И. ГЕРМАШЕВ**,
С.И. ДЯДЯ, канд. техн. наук, **Е.Б. КОЗЛОВА**,
П.А. КАМОРКИН, канд. техн. наук, Запорожжє, Україна

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ УРОВНЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ ТОНКОСТЕННОЙ ДЕТАЛИ ПРИ ЕЕ КОНЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

У статті описана методика визначення інтенсивності збудження автоколивань при кінцевому фрезеруванні тонкостінної деталі. Приведені експериментальні залежності впливу розмаху автоколивань в зоні профілювання - R_2 на шорсткість обробленої поверхні - Ra .

В статье описана методика определения интенсивности возбуждения автоколебаний при концевом фрезеровании тонкостенной детали. Приведены экспериментальные зависимости влияния размаха автоколебаний в зоне профилирования - R_2 на шероховатость обработанной поверхности - Ra .

In the article methodology of determination of intensity of excitation of self-excited oscillations is described at the end-milling of the thin-walled detail. Experimental dependences over of influence of scope of self-excited oscillations are brought in the zone of profiling - R_2 on the roughness of a treat surface - Ra .

Создание многокоординатных фрезерных станков с одновременным CNC управлением скоростью и направлением движения обрабатываемой детали и инструмента поставили новые задачи перед технологами.

Появились возможности с одной установки детали обрабатывать сложные поверхности ее элементов, которые могут быть тонкостенными.

В авиадвигателестроении такими деталями являются моноколеса компрессора с тонкостенными элементами - лопатками. К лопаткам предъявляются высокие требования по шероховатости и точности окончательных размеров, однако недостаточная жесткость приводит к

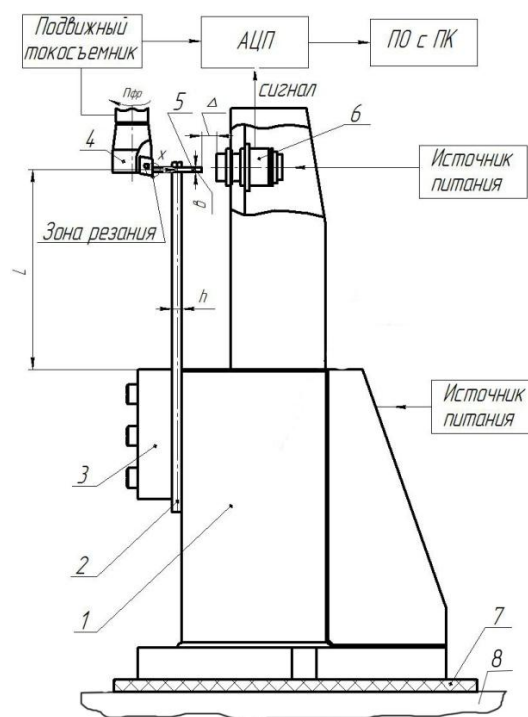
появлению вибраций при их окончательной обработке концевым фрезерованием. Установлено [1], что вид колебаний тонкостенных деталей в процессе фрезерования в каждый момент времени может быть различным. Во время врезания и выхода каждого очередного зуба фрезы в припуск деталь отклоняется от положения равновесия в результате вынужденных колебаний с «зубчатой» частотой, зависящей от скорости вращения фрезы и количества зубьев. В определенном скоростном диапазоне вращения инструмента на вынужденные отклонения детали дополнительно накладываются регенеративные автоколебания, связанные с резанием по волнистому следу на поверхности резания, оставленному предыдущим зубом фрезы. Частота этих автоколебаний значительно выше, чем «зубчатая» частота и зависит в основном от динамических характеристик упругих систем тонкостенной детали и концевой фрезы, а также условий контакта зуба фрезы и детали в период их зацепления при срезании припуска. Особенностью концевой фрезерования тонкостенных деталей является тот факт, что из-за малых величин радиальной – a_e и осевой – a_p глубин резания по сравнению с размерами диаметра фрезы, в резании участвует всегда только один зуб, поэтому в период холостого хода, когда предыдущий зуб фрезы уже вышел из зацепления с припуском, а последующий еще не вошел, тонкостенная деталь совершает свободные затухающие колебания с частотой собственных колебаний.

Таким образом, при концевом фрезеровании тонкостенной детали она может быть в состоянии возбуждения вынужденными колебаниями, вынужденными колебаниями с наложением автоколебаний и совершать свободные затухающие колебания.

Формирование шероховатости обработанной поверхности при цилиндрическом фрезеровании происходит в **зоне профилирования** [2], которая является частью поверхности резания, оставшейся на обработанной поверхности в результате последовательного срезания припуска зубьями фрезы. Известно, что в скоростной зоне возбуждения регенеративных автоколебаний, связанных с появлением волнистости на поверхности резания резко ухудшается шероховатость [1]. Таким образом, существует прямая связь между возникновением автоколебаний в

тонкостенной детали при ее фрезеровании и шероховатостью обработанной поверхности.

Авторами статьи разработана оригинальная методика измерения всех видов колебаний возбуждаемых в тонкостенной детали при ее концевом фрезеровании [3]. Подробное описание измерительного стенда приведено в работе [4], рис. 1. На стенде имеется две системы измерения. Первая измеряет отклонение тонкостенной пластины – 2 при помощи датчика перемещений – 6, а вторая – измеряет наличие электрического контакта между деталью и фрезой во время ее обработки. Для этого измерительный стенд изолируют от стола фрезерного станка, а к вращающейся фрезе подведен контакт токосъемника. Сигналы отклонения детали во времени (осциллограмма) и наличие контакта между деталью и инструментом синхронизированы и могут быть записаны после оцифровки.



- 1 – Массивное основание; 2 – Упругая система (УС) тонкостенной детали (тонкостенная пластина); 3 – Прижим; 4 – Концевая фреза;
 5 – Обрабатываемый образец; 6 – Датчик перемещения; 7 – Электроизолятор;
 8 – Стол фрезерного станка; Δ – Измерительный зазор

Рисунок 1 – Общая схема измерительного стенда для исследования колебаний тонкостенной детали и условий ее контактирования с инструментом при концевом фрезеровании

На рис. 2 представлен базовый фрагмент осциллограммы (БФО) колебания детали между врезанием двух соседних зубьев. БФО позволяет полностью определять условия возбуждения детали, начиная с момента врезания зуба в точке A , ее отклонения под действием силы резания и появления автоколебаний в период резания до точки B выхода зуба из зацепления со срезаемым припуском. От точки B до точки A' деталь совершает свободные затухающие колебания, до момента врезания следующего зуба в точке A' . Это время является временем холостого хода - $\tau_{\text{д.д.}}$. Полное время между точками A и A' врезания соседних зубьев определяется как время одного цикла $\tau_{\text{цикла}}$, а осциллограмма отклонения детали за это время и рассматривается как БФО. Точку врезания зуба A и выхода из зацепления B на БФО определяют по наличию электрического контакта между деталью и инструментом.

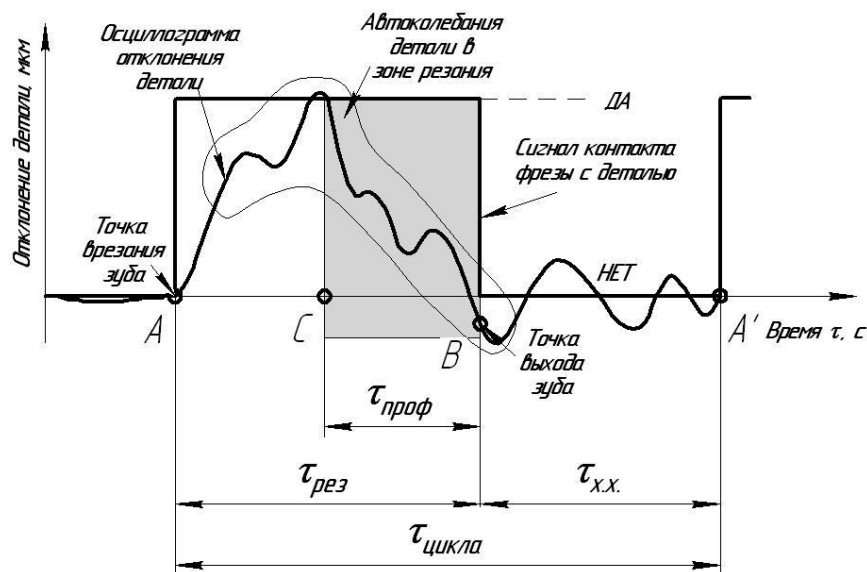


Рисунок 2 – Базовый фрагмент осциллограммы (БФО) отклонения тонкостенной детали во время фрезерования и сигнал контакта фрезы с поверхностью резания (фрезерование попутное)

Целью исследования является разработка методики оценки уровня интенсивности автоколебаний, возникающих в тонкостенной детали при ее концевом фрезеровании. Умение точно оценивать величину интенсивности возникающих автоколебаний позволяет проводить разработку различных технологических приемов подавления этого вида вибраций. Наиболее

эффективными технологическими приемами подавления автоколебаний являются:

- Увеличение жесткости путем применения специальных сред, окружающих тонкостенную деталь.
- Применение новых конструкций инструментов с переменной геометрией.
- Использование режимов фрезерования с модулированием скоростью главного движения и др.

Условия проведения исследований.

а). **Оборудование** – универсально фрезерный станок модели FWD-32J.

б). **Инструмент** – концевая 3-х зубая фреза CANELA D20 Z3 со сменными пластинами из твердого сплава APKT100305PDER JC8050 фирмы Dijet. В эксперименте устанавливался 1 режущий зуб. Вместо двух других зубьев устанавливали равные по весу свинцовые грузики, обеспечивающие балансировку фрезы. Геометрия режущего зуба: $\gamma=6^\circ$, $\alpha=11^\circ$, $\lambda=-10^\circ$. Вылет фрезы $\varnothing 20$ мм составлял $L_{фр}=36$ мм, жесткость фрезы $j_{фр}=17888$ Н/мм, частота собственных колебаний $f_{фр}=781$ Гц, декремент затухания $\delta_{фр}=0,72$.

в). **Образец из обрабатываемого материала** размером 50x20x2 (Ст3кп ГОСТ 380-2005).

г). **Упругая система тонкостенной детали (УС).** Пластина с размерами вылета $L=80$ мм, $B=60$ мм, $h=4$ мм. Материал Сталь 65Г (HRC 60). Вместе с закрепленным обрабатываемым образцом УС детали имеет следующие характеристики: жесткость детали $j_{дет}=228$ Н/мм, частота собственных колебаний $f_{дет}=364$ Гц, декремент затухания $\delta_{дет}=0,091$.

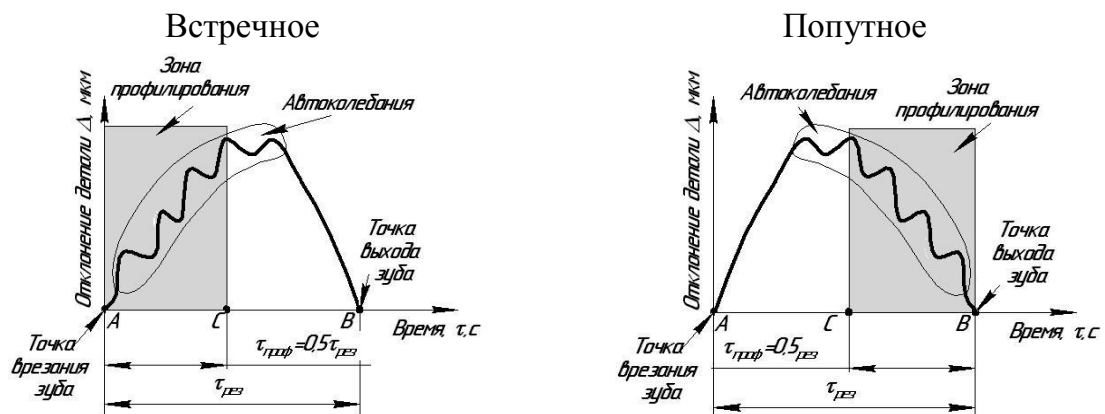
д). Режимы фрезерования:

- скорость вращения шпинделя от $n=224$ до 1800 об/мин;
- продольная подача стола от $S_{мин}=11,2$ до 90 мм/об;
- подача на зуб $S_z=0,05$ мм/зуб;
- осевая глубина $a_p=2$ мм;
- радиальная глубина $a_e=0,5$ мм;
- направление подачи – встречное и попутное;
- условие резания – свободное, косоугольное.

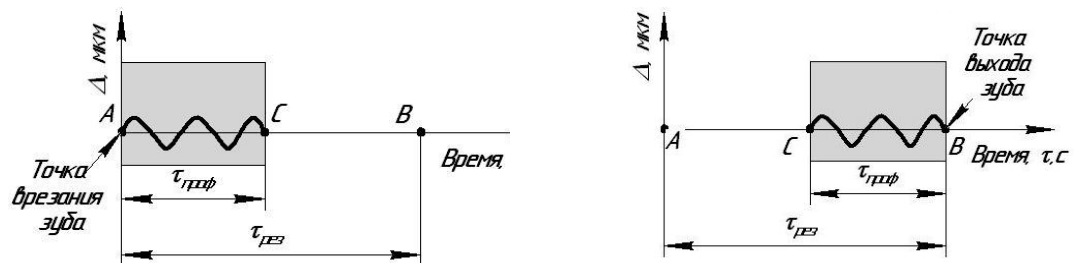
Разработка методики определения величины размаха автоколебаний – R_2

На рис. 3 показана последовательность определения величины размаха автоколебаний R_2 на основе анализа базовых фрагментов осциллограммы (БФО) колебаний тонкостенной детали в процессе ее фрезерования. Определение параметра R_2 состоит из 3-х этапов.

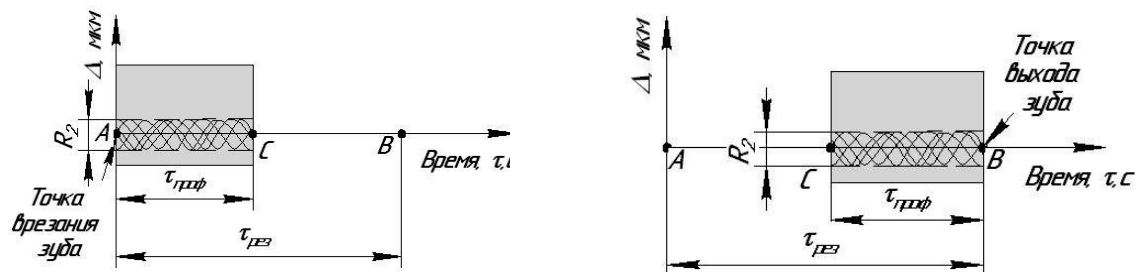
1 этап – Определение зоны профилирования



2 этап – Спрямление БФО в зоне профилирования



3 этап – Определение размаха автоколебаний R_2



$\tau_{рез}$ – время резания, с, $\tau_{проф}$ – время профилирования, с.

Рисунок 3 – Последовательность определения по БФО размаха автоколебаний в зоне профилирования – R_2

На 1 этапе – определяется время резания – $\tau_{рез}$ зубом фрезы, путем совмещения осциллограммы колебаний детали и наличия контакта зуба фрезы с деталью. Далее определяют время профилирования – $\tau_{проф}$, которое составляет половину от времени резания – $\tau_{рез}$. При встречном фрезеровании участок профилирования примыкает к точке А входа зуба фрезы в срезаемый припуск, а при попутном к точке В выхода зуба из зоны резания.

На 2 этапе – часть осциллограммы колебания детали, относящейся к зоне профилирования, спрямляют, применяя фильтр Савицкого-Голея [5].

На 3 этапе – после наложения колебаний в зоне профилирования от большого ($n \geq 100$) числа последовательных резов можно определить величину размаха автоколебаний детали – R_2 . Точка врезания зуба А является началом совмещения каждого реза при встречном фрезеровании, а точка В выхода зуба – началом совмещения при попутном фрезеровании.

Обсуждение результатов исследований.

На рис. 4 приведены кривые размаха автоколебаний R_2 в зоне профилирования от скорости вращения фрезы и направления подачи.

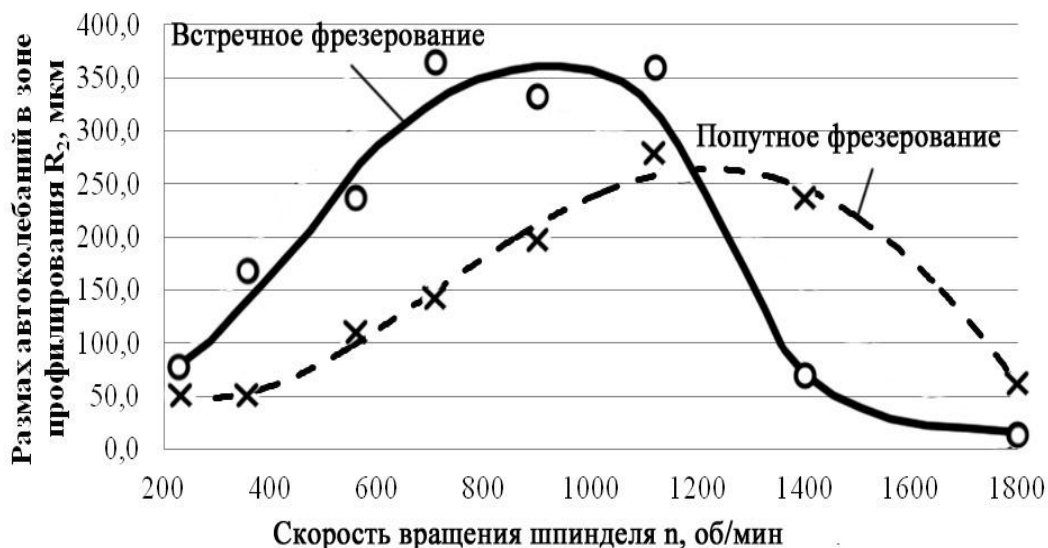


Рисунок 4 – Влияние направления фрезерования и скорости вращения шпинделя на размах автоколебаний детали в зоне профилирования – R_2

Можно видеть, что уровень автоколебаний при встречном фрезеровании значительно выше, чем при попутном, а скорость, при

которой автоколебания вырождаются при встречном фрезеровании ниже, чем для попутного. Различия в механизмах возбуждения и вырождения автоколебаний при изменении направления подачи требуют специальных исследований.

На рис. 5 показаны кривые оценки шероховатости обработанной поверхности по параметру R_a при изменении скорости вращения фрезы и направления подачи. Значения параметров R_2 и R_a измерены одновременно для каждого сочетания режимов фрезерования.

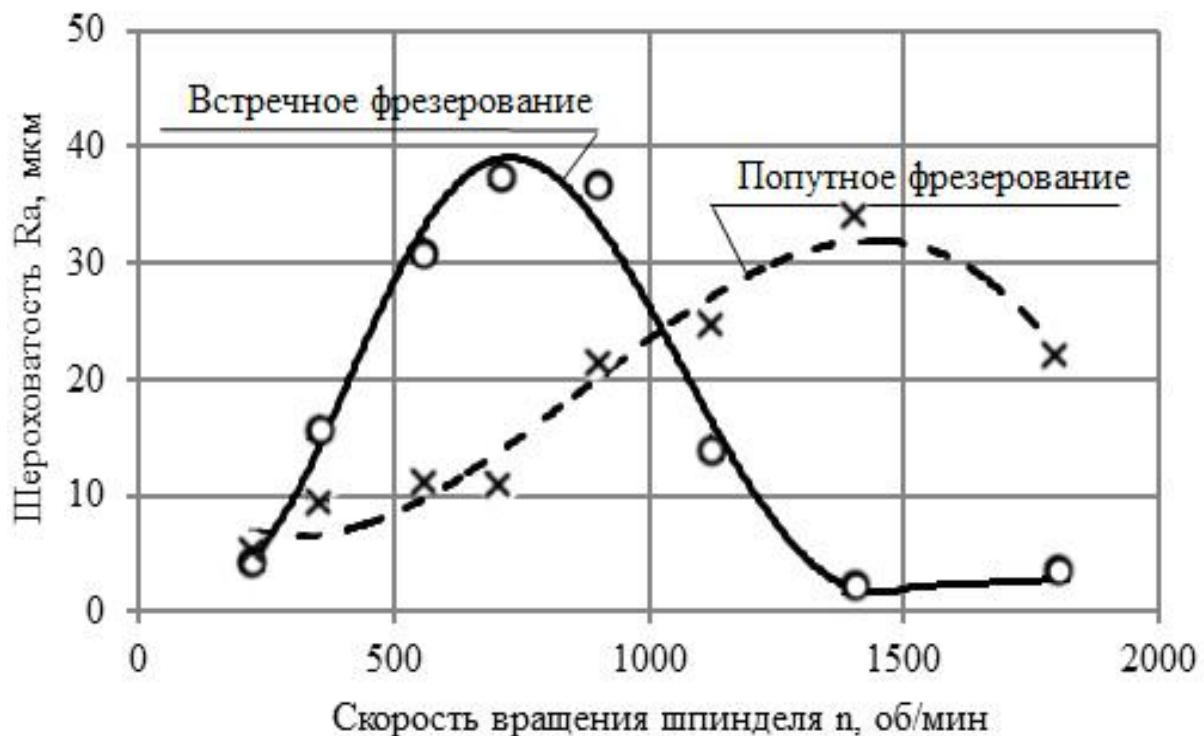


Рисунок 5 – Влияние направления фрезерования и скорости вращения шпинделя на шероховатость обработанной поверхности тонкостенной детали

Сравнение кривых, приведенных на рис. 4 и рис. 5, указывает на очевидную связь этих характеристик, тесноту которой легко определить корреляционным анализом. В табл. 1 приведены экспериментальные значения R_2 и R_a , представленные на рис. 4 и 5.

Таблица 1 – Экспериментальные значения величины размаха автоколебаний в зоне профилирования – R_2 и шероховатости обработанной поверхности – R_a при различных условиях фрезерования

№ эксперимента	Скорость вращения шпинделя n , об/мин	Встречное фрезерование		Попутное фрезерование	
		х	у	х	у
		Размах в зоне профилирования R_2 , мкм	Шероховатость R_a , мкм	Размах в зоне профилирования R_2 , мкм	Шероховатость R_a , мкм
	224	79,5	4,6	36,8	5,0
	355	173,4	16,0	57,2	9,4
	560	257,6	31,3	94,1	11,4
	710	398,6	37,7	129,3	10,8
	900	247,7	37,2	171,1	21,2
	1120	127,5	14,1	199,9	24,9
	1400	35,0	2,7	240,9	34,0
	1800	6,1	4,2	81,2	21,9

Результаты корреляционного анализа показали, что коэффициент парной корреляции для встречного фрезерования составляет $r = 0,94$, а для попутного $r = 0,87$.

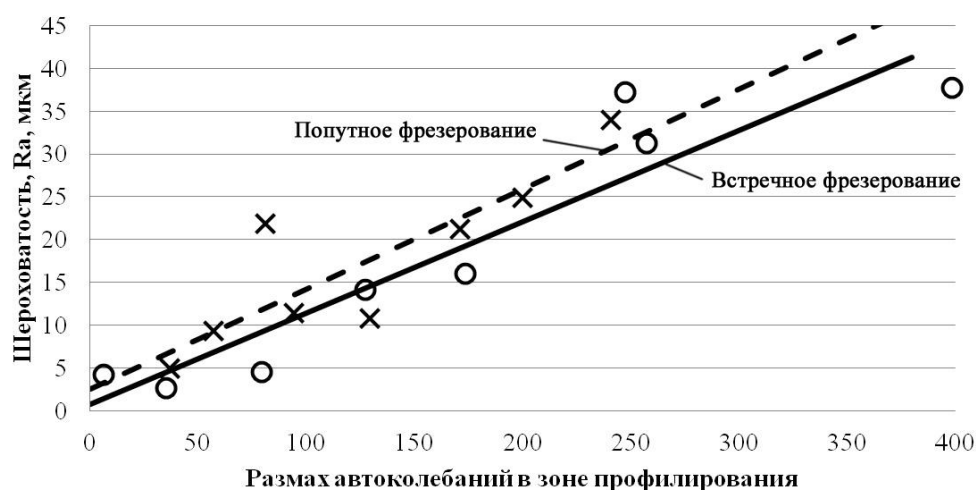


Рисунок 6 – Зависимость влияния размаха автоколебаний в зоне профилирования R_2 на шероховатость обработанной поверхности – R_a от направления подачи

Линии регрессии можно описать уравнением $Ra = 0,11R_2 + 0,83$ для встречного фрезерования и $Ra = 0,12R_2 + 2,56$ для попутного, которые расположены в статистически незначимой близости (рис. 6).

В связи с этим, повторный корреляционный анализ был проведен для всего массива данных, без разделения их по направлениям подачи. В этом случае коэффициент парной корреляции был равным $r = 0,91$, а уравнение линии регрессии $Ra = 0,11R_2 + 2,4$ (рис. 7).

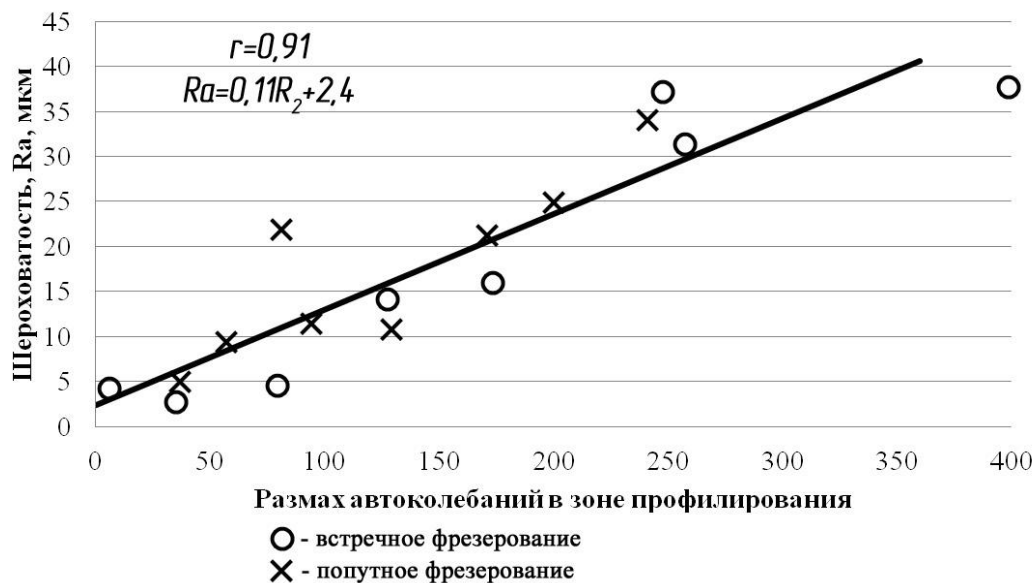


Рисунок 7 – Обобщенная зависимость влияния размаха автоколебаний в зоне профилирования R_2 на шероховатость обработанной поверхности – Ra

Таким образом, в результате проведенных исследований показано, что интенсивность автоколебаний в зоне профилирования – R_2 однозначно определяет уровень шероховатости обработанной поверхности, независимо от направления подачи. Эти результаты позволяют утверждать, что параметр R_2 является надежным критерием оценки интенсивности автоколебаний.

Выводы:

1. В статье описана методика определения интенсивности возбуждения автоколебаний – R_2 при концевом фрезеровании тонкостенной детали для различных направлений подачи.

2. Показано, что использование базового фрагмента осциллограммы (БФО) для оценки вибрационных явлений возникающих в тонкостенной детали является статистически надежным источником информации.

Список использованных источников: 1. 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. 2. Розенберг Ю. А. Резание материалов : Учебник для техн. вузов. – Курган : Изд-во ОАО «Полиграфический комбинат» Зауралье: 2007. – 294 с.: ил. 3. Пат. UA 94974 МПК (2006) G01H11/00; G01M7/02, Стенд для дослідження коливань при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних елементів деталей, Логоминов Віктор Олексійович, Гермашев Антон Ігорович, Дядя Сергій Іванович, Козлова Олена Борисівна - u201405981; заявл 02.06.2014; опубл 10.12.2014. 4. Внуков Ю. Н. Стенд для исследования механических колебаний при фрезеровании маложестких деталей концевыми фрезами. / Ю.Н. Внуков, В.А. Логоминов, П.А. Каморкин // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – Вып. 79 – С. 32-37. 5. Логоминов В. А. Методика исследования регенеративных автоколебаний по Cut-граммам при фрезеровании тонкостенных деталей / Логоминов В. А. // Сучасні технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. Логоминов В. А. – Вып. 9. – Харків : НТУ «ХПИ» 2014. – С. 179-182.

Bibliography (transliterated): 1. 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. 2. Rozenberg Yu. A. Rezanie materialov : Uchebnik dlya tehn. vuzov. – Kurgan : Izd-vo ОАО «Poligraficheskiy kombinat» Zaurale: 2007. – 294 p.: il. 3. Pat. UA 94974 MPK (2006) G01H11/00; G01M7/02, Stend dlya doslidzhennya kolivan pri kintsevomu tsilindrichnomu frezeruvanni tonkostinnih elementiv detaley, Logominov Viktor Oleksiyovich, Germashev Anton Igorovich, Dyadya Sergiy Ivanovich, Kozlova Olena Borisivna – u201405981; zayavl 02.06.2014; opubl 10.12.2014. p 4. Vnukov Yu. N. Stend dlya issledovaniya mehanicheskikh kolebaniy pri frezerovanii malozhestkih detaley kontsevyimi frezami. / Yu. N. Vnukov, V. A. Logominov, P. A. Kamorkin // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah. – Harkov : NTU «HPI», 2011. – Vyip. 79 – P. 32–37. 5. Logominov V. A. Metodika issledovaniya regenerativnyih avtokolebaniy po Cut-grammam pri frezerovanii tonkostennyih detaley / Logominov V. A. // Suchasni tehnologiyi v mashinobuduvanni : zb. nauk. prats. Logominov V. A. – Vyip. 9. – Harkiv : NTU «HPI» 2014. – P. 179–182.

УДК 621.9.06-752

Ю.Н. ВНУКОВ, д-р техн. наук,
М.В. КУЧУГУРОВ, А.Е. ЗУБАРЕВ, Запоріжжє, Україна

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ПРИВОДА ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ ТОКАРНОГО СТАНКА В РЕЖИМЕ ПОСТОЯННОГО ВАРЬИРОВАНИЯ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ ШПИНДЕЛЯ

В статті приведені результати експериментального дослідження роботи приводу головного руху токарного верстата в умовах девіації частоти обертання шпинделя. Представлені основні математичні моделі керування фактичною частотою обертання шпинделя, що застосовуються для зниження рівня автоколивань при механічній обробці.

В статье приведены результаты экспериментального исследования работы привода главного движения токарного станка в условиях девиации частоты вращения шпинделя. Представлены основные математические модели управления фактической частотой вращения шпинделя, используемые для подавления автоколебаний при механической обработке.

The results of the experimental lathe's main-drive work research in spindle speed deviation conditions are submitted. The basic mathematic models of the actual spindle speed control are presented, which are used for self-excited vibration suppressing in machining.

Точение в условиях постоянного варьирования скоростью резания является перспективным методом борьбы с автоколебаниями. Еще в середине 70-80х годов прошлого века был предложен метод механической обработки с переменной частотой вращения шпинделя для повышения виброустойчивости процесса резания, разрушая механизм регенерации [1, 2, 3]. С появлением современного металлорежущего оборудования с системой числового программного управления (ЧПУ), позволяющей в режиме реального времени управлять движениями станка, стало возможным полноценно реализовать данный способ обработки.

Главной особенностью работы привода в условиях варьирования частоты вращения шпинделя является существенное влияние сил инерции его механических частей станка. В зависимости от закона изменения скорости вращения во времени, привод главного движения не всегда способен в полной мере осуществить управление в соответствии с заданием.

Целью данной статьи является изучение возможностей работы привода главного движения в режиме постоянного варьирования частотой вращения шпинделя. В данной работе исследования проводились на токарном станке, так как шпиндель последнего, как правило, обладает наибольшей массой в сравнении со станками фрезерной группы.

Широко распространенным способом управления скоростью главного движения (модуляция) является задание синусоидального закона изменения числа оборотов [4, 5, 6], который можно выразить следующей формулой:

$$n_{\Phi} = n_{ном} \cdot \left(1 + RVA \cdot \sin \left(2\pi \cdot RVF \cdot \frac{n_{ном}}{60} \cdot t \right) \right), об / мин \quad (1)$$

где $n_{ном}$ – номинальная частота вращения шпинделя, об/мин;

RVA – отношение амплитуды изменения фактической частоты вращения шпинделя Δn к номинальному значению $n_{ном}$;

RVF – отношение частоты модуляции F , Гц к номинальной частоте вращения шпинделя ($n_{ном} / 60$, Гц);

t – время, с

Для удобства программирования и обработки результатов экспериментов в данной работе используется следующее выражение:

$$n_{\Phi} = n_{ном} + \frac{n_{ном} \cdot A}{100} \cdot \sin(2\pi \cdot F \cdot t), об / мин \quad (2)$$

где F – частота модуляции, Гц;

A – процентное отношение амплитуды изменения фактической частоты вращения Δn к номинальному значению $n_{ном}$;

$$A = \frac{\Delta n}{n_{ном}} \cdot 100, \% \quad (3)$$

Подставляя различные сочетания параметров частоты F и амплитуды A , можно определить область значений, которые привод способен выполнить в полном соответствии с заданием. Начальные исследования режима модуляции были проведены на токарном станке SBL500 TRENS при холостом вращении шпинделя без резания (рис. 1).

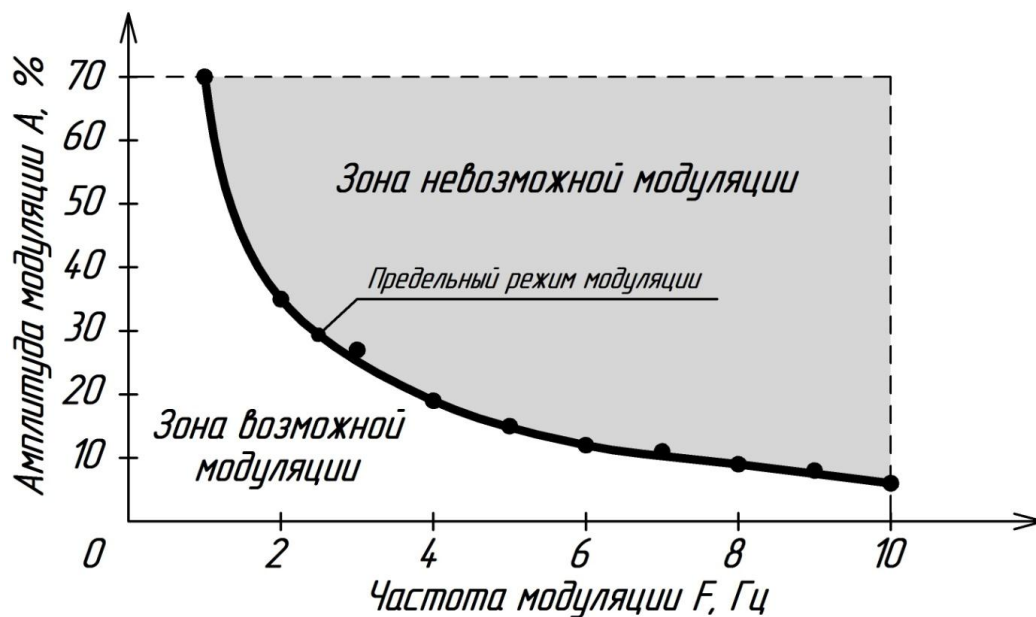


Рисунок 1 – Амплитудно-частотная характеристика работы привода главного движения токарного станка SBL500 TRENS в режиме модуляции

Изучение работы привода главного движения проводилось путем подбора различных сочетаний параметров F и A . Для каждого значения частоты F определялась предельная амплитуда модуляции A , которую способен выполнить станок. Данную функцию предоставляет программный пакет стойки ЧПУ Sinumerik 840D PL «Серво-трейс», который дает возможность построить графики изменения заданной и фактической частоты вращения шпинделя во времени. Сопоставляя

последние можно определить степень выполнения приводом заданного математического закона движения.

Линия, соответствующая максимально возможной амплитуде модуляции, которую станок способен реализовать (рис. 1), делит область всех возможных значений на:

- зону возможной модуляции, каждое значение из которой привод способен выполнить с минимальным отклонением от заданных значений;
- зону невозможной модуляции – значения, при которых влияние инерции не позволяет получить заданную глубину A при данной частоте F .

В ходе исследований минимальная частота модуляции F составляла 1 Гц, так как при меньших ее значениях шпиндель способен достичь амплитуды $A = 100\%$, что означает полную его остановку при минимальной частоте вращения согласно синусоидальному закону, что является недопустимым при дальнейших исследованиях в условиях резания ввиду возможной поломке резца. Максимальное значение параметра $F = 10$ Гц выбрано исходя из недопущения перегрева привода и выхода из строя станка.

Дальнейшие исследования модуляции частотой вращения шпинделя проводились в условиях резания, когда в процессе съема припуска привод главного движения испытывает момент сопротивления. Выполнялось точение алюминиевой заготовки со следующими режимами: глубина резания $t = 2$ мм; диаметр заготовки $D = 68$ мм; подача на оборот $S_0 = 0,15$ мм; номинальная частота вращения шпинделя $n_{ном} = 500$ об/мин; резец PCLNL 2525 M12, режущая пластина CNMG 12 04 08-WR. Проведенные измерения показали, что воздействие процесса резания на работу привода в условиях модуляции меньше по сравнению с влиянием сил инерции. Полученная амплитудно-частотная характеристика режима работы станка в условиях варьирования частотой вращения шпинделя при снятии припуска полностью совпадает с характеристикой, полученной при холостом движении (рис. 1). Следовательно, работа привода главного движения в условиях модуляции в наибольшей степени зависит от массы вращающихся элементов станка и практически не зависит от внешней нагрузки процессом резания.

Современные системы числового программного управления позволяют программировать движения станка любой степени сложности. Встроенные возможности работы в режиме реального времени позволяет управлять фактической частотой вращения шпинделя согласно заданному математическому закону. Применение того или иного алгоритма обуславливается степенью снижения амплитуды автоколебаний при резании в данных условиях. Последнее будет зависеть от:

- номинальных режимов и условий обработки;
- параметров инструмента;
- массы и материала заготовки;
- инерционных свойств привода главного движения.

Примеры наиболее распространенных моделей работы привода представлены в табл. 1, 2, выполненные путем моделирования с использованием программного обеспечения MatLAB.

Рассматривая гармонический закон изменения частоты вращения шпинделя (табл. 1), задавались следующие параметры:

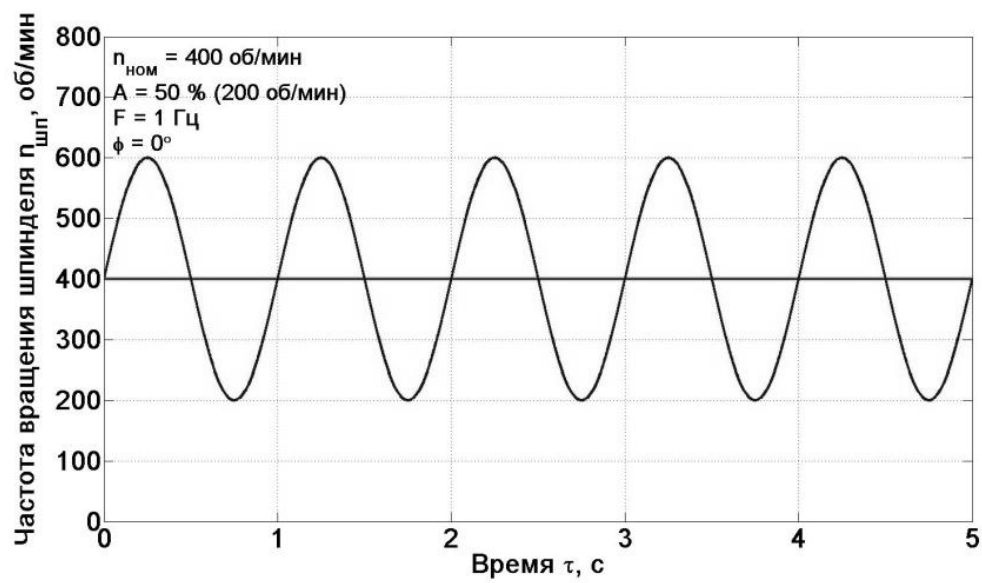
- $n_{ном}$ – номинальная частота вращения шпинделя, об/мин;
- A , A_{amp} , A_{freq} , A_{phase} – соответственно номинальное значение, амплитуда, частота и начальное значение фазы изменения амплитуды модуляции;
- F , F_{amp} , F_{freq} , F_{phase} – соответственно номинальное значение, амплитуда, частота и начальное значение фазы изменения частоты модуляции;
- Φ – начальная фаза изменения фактической частоты вращения шпинделя.

В работе [7] предлагается в качестве высокоэффективного метода борьбы с вибрациями использование стохастической модуляции, когда величина частоты вращения шпинделя меняется во времени по случайному закону. В табл. 2 представлены результаты моделирования данного режима работы. Параметрами стохастической модуляции являются:

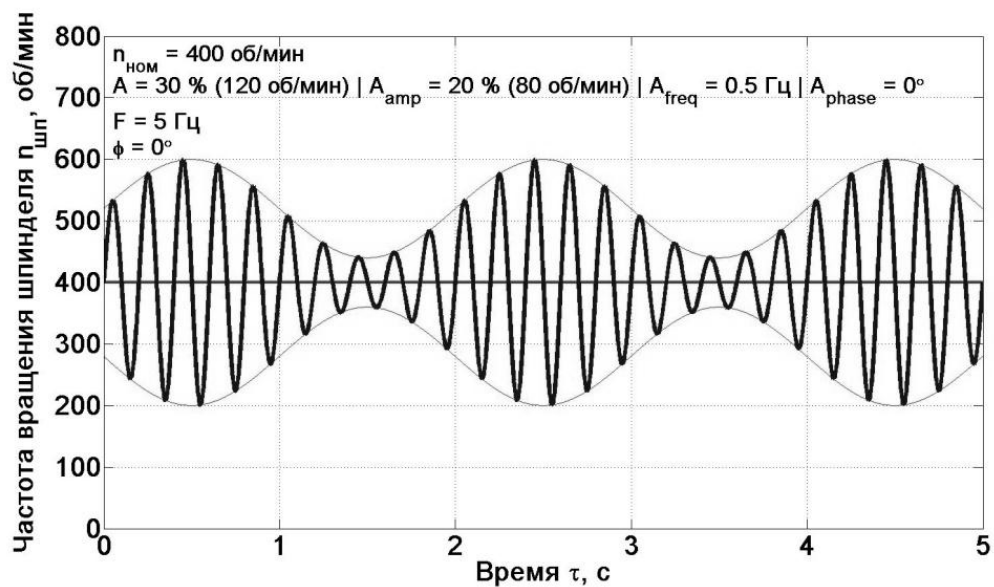
- $n_{ном}$ – номинальная частота вращения шпинделя, об/мин;
- A – максимальная амплитуда модуляции, %;
- T – период стохастической амплитудной модуляции, с.

Таблица 1 – Моделирование изменения фактической частоты вращения шпинделя по гармоническому закону

Синусоидальная модуляция

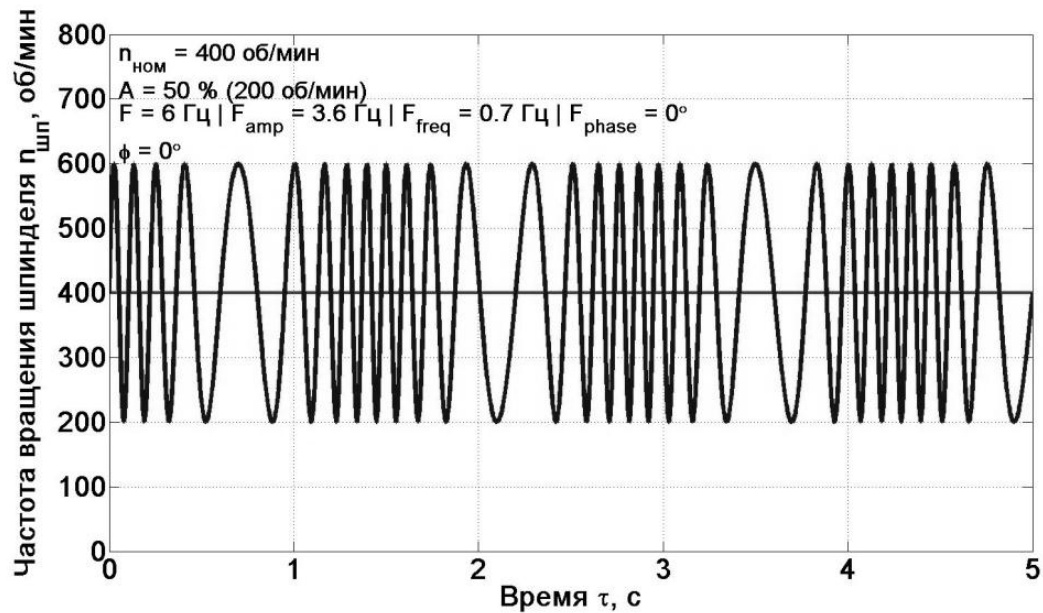


Амплитудная модуляция



Продолжение табл. 1

Частотная модуляция



Амплитудно-частотная модуляция

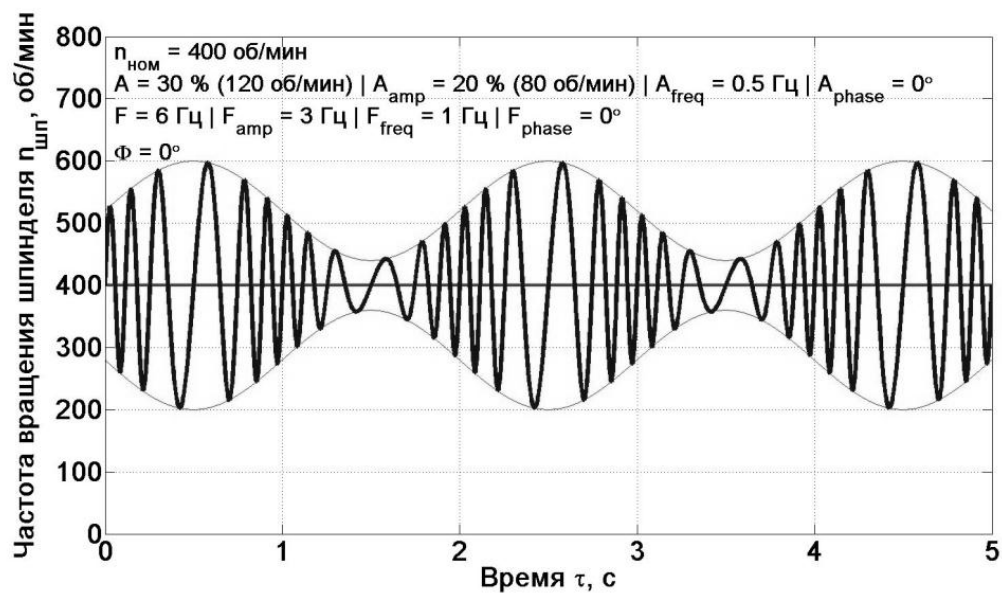
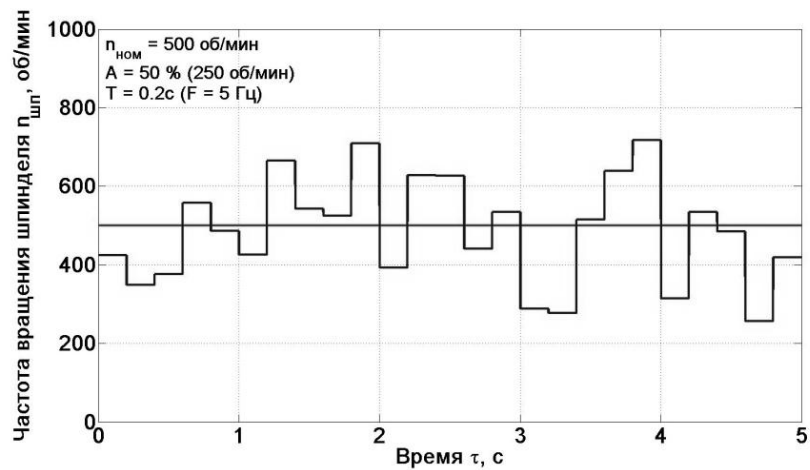
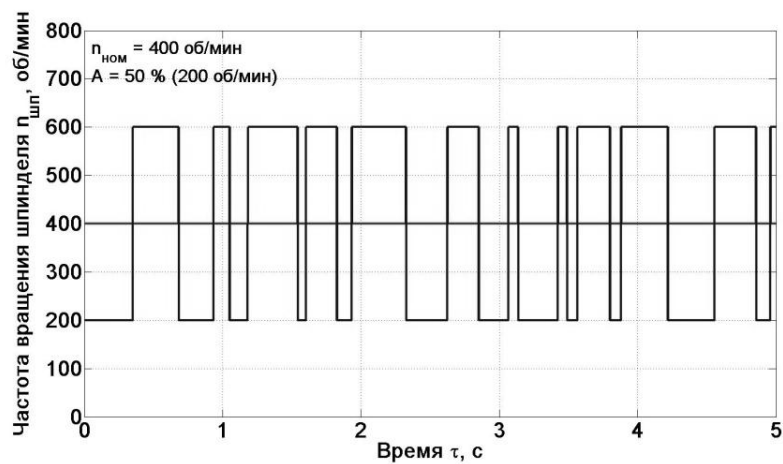


Таблица 2 – Моделирование изменения фактической частоты вращения шпинделя по стохастическому закону

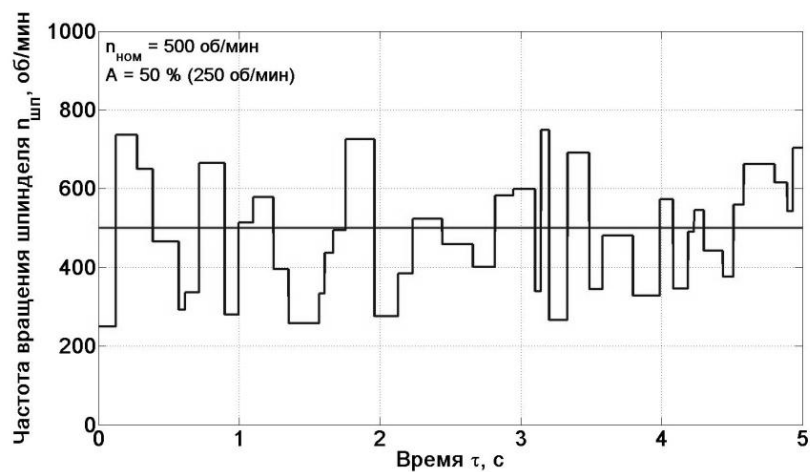
Амплитудно-стохастическая модуляция



Частотно-стохастическая модуляция



Амплитудно-частотная стохастическая модуляция



Таким образом, степень сложности алгоритма управления частотой вращения шпинделя зависит от умений и навыков исследователя, который может предложить нестандартный и эффективный подход к решению поставленной задачи. Например, в работе Афониной Н.А. [8, 9] предлагается использовать гармоническую модуляцию со стохастическим изменением амплитуды A и частоты F . Однако поиск наиболее эффективного из всех существующих требует проведения тщательных исследований, способных раскрыть понимание динамики процессов механической обработки в условиях переменной скорости резания.

С целью проверки возможностей программирования стойки ЧПУ и работы привода главного движения в смоделированных режимах, были написаны управляющие программы для токарного станка SBL500 TRENS с последующей их отработкой и измерением параметров движения. На рис. 2-6 показаны графики изменения заданной (Tr_1) и фактической (Tr_2) частоты вращения шпинделя во времени.

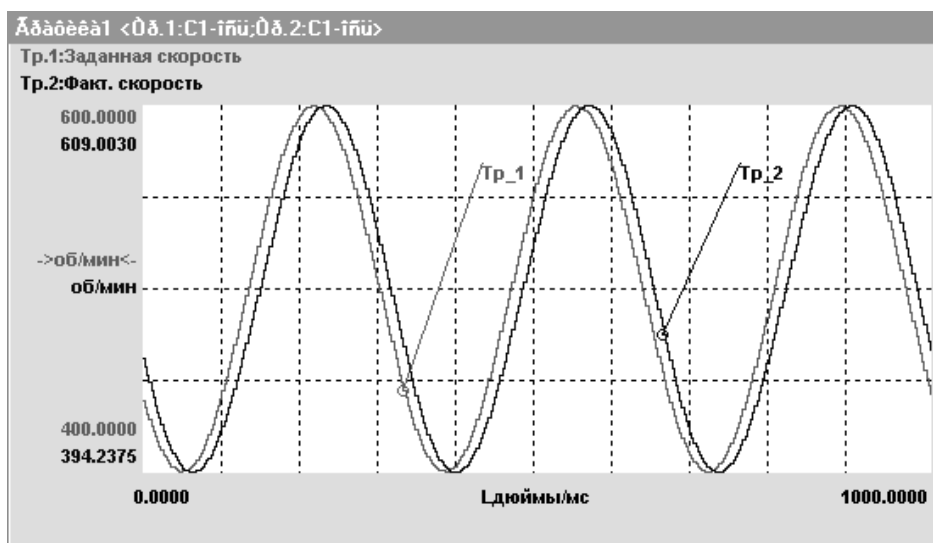


Рисунок 2 – Изменение частоты вращения шпинделя при синусоидальной модуляции:

$$n_{\text{ном}} = 500 \text{ об/мин}; A = 20\%; F = 3 \text{ Гц}$$

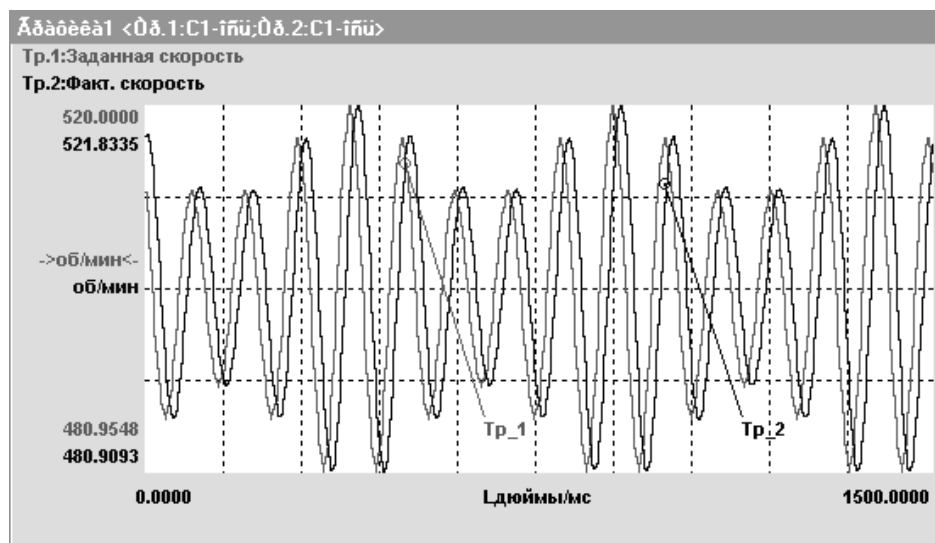


Рисунок 3 – Изменение частоты вращения шпинделя при амплитудной модуляции:

$$n_{\text{ном}} = 500 \text{ об/мин}; A = 3\%; A_{\text{amp}} = 1\%; A_{\text{freq}} = 2 \text{ Гц};$$

$$A_{\text{phase}} = 90^\circ; F = 10 \text{ Гц}; \Phi = 0^\circ$$

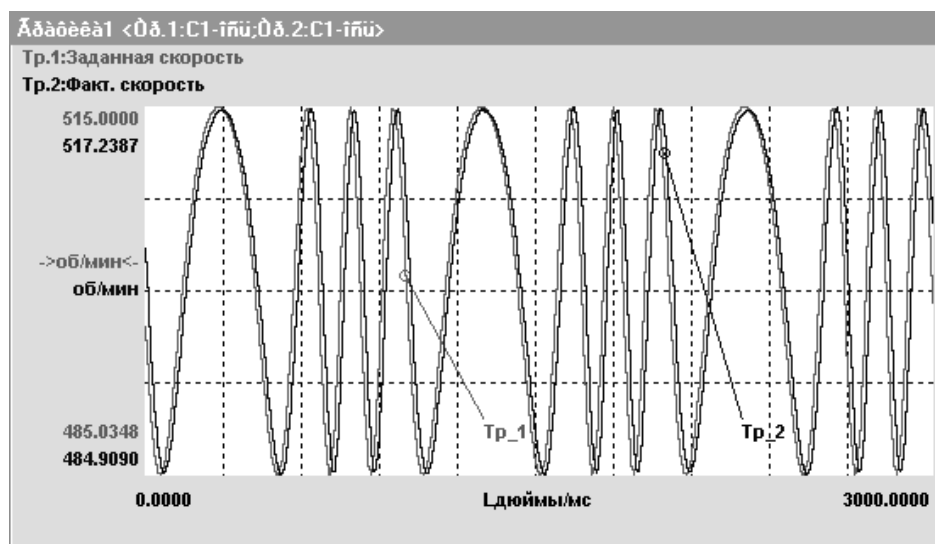


Рисунок 4 – Изменение частоты вращения шпинделя при частотной модуляции:

$$n_{\text{ном}} = 500 \text{ об/мин}; A = 3\%; A_{\text{phase}} = 90^\circ; F = 4 \text{ Гц};$$

$$F_{\text{amp}} = 2,5 \text{ Гц}; F_{\text{freq}} = 1 \text{ Гц}; F_{\text{phase}} = 0^\circ; \Phi = 0^\circ$$

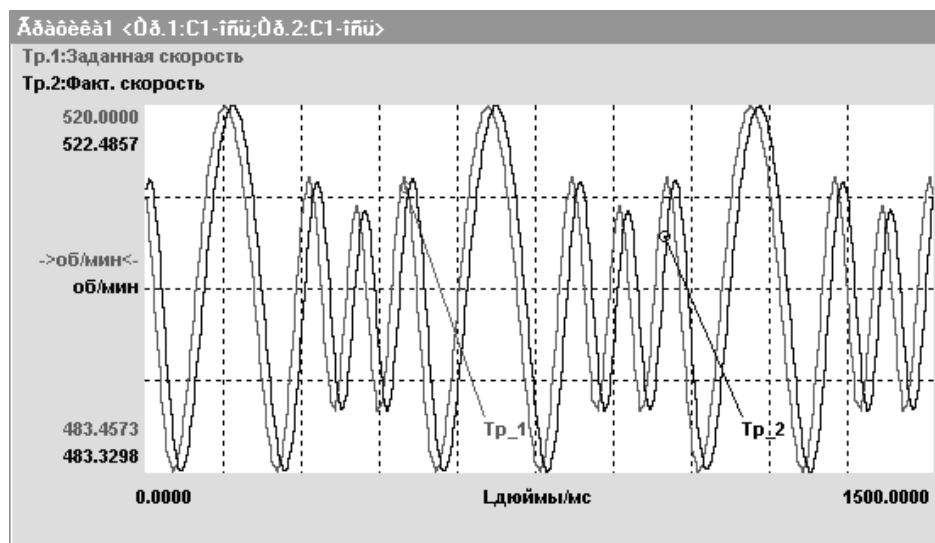


Рисунок 5 – Изменение частоты вращения шпинделя при амплитудно-частотной модуляции:

$n_{\text{ном}} = 500 \text{ об/мин}$; $A = 3\%$; $A_{\text{amp}} = 1\%$; $A_{\text{freq}} = 2 \text{ Гц}$;
 $A_{\text{phase}} = 270^\circ$; $F = 8 \text{ Гц}$; $F_{\text{amp}} = 4 \text{ Гц}$; $F_{\text{freq}} = 2 \text{ Гц}$;
 $F_{\text{phase}} = 0^\circ$; $\Phi = 0^\circ$

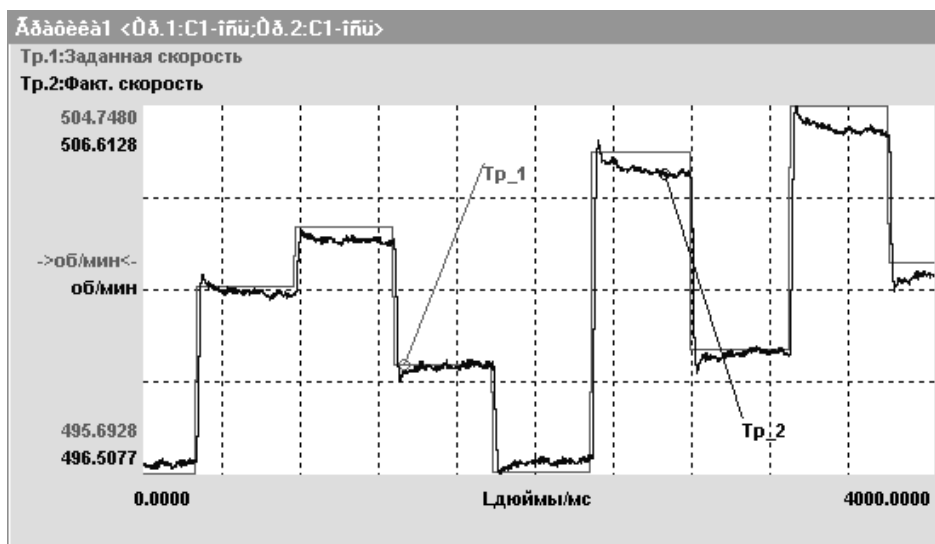


Рисунок 6 – Изменение частоты вращения шпинделя при стохастической модуляции:

$n_{\text{ном}} = 500 \text{ об/мин}$; $A = 20\%$; $F = 3 \text{ Гц}$

Выводы. Современные металлорежущие станки позволяют выполнять механическую обработку резанием в условиях девиации скоростью вращения шпинделя. Простота программирования управления движениями станка дает возможность задавать различные математические законы изменения фактического значения данной величины. Экспериментально установлено, что в условия модуляции данной величиной процесс резания не оказывает существенного влияния на вращательное движение шпинделя, так как преобладает действие инерции его механических частей. В дальнейшем этот режим управления возможно использовать на производстве, обеспечивая безвибрационную обработку. Однако необходимо проводить дальнейшие исследования влияния различных параметров девиации на степень подавления вибраций в зоне резания.

Список использованных источников: 1. Inamura T., Sata T. Stability analysis of cutting under varying spindle speed / Ann. C.I.R.P., 1974, Volume 23, pp. 80-85. 2. Sexton J.S., Milne R.D. and etc. A stability analysis of single-point machining with varying spindle speed / Applied Mathematical Modeling, September 1977, Volume 1, Issue 6, pp.310-318. 3. Jemielniak K., Widota A. Suppression of self-excited vibration by the spindle speed variation method / International Journal of Machine Tool Design and Research, January 1984, Volume 24 (3), pp.207-214. 4. Alberteli P., Musletti S. and etc. Spindle speed variation in turning: technological effectiveness and applicability to real industrial cases / International Journal of Advanced Manufacturing Technology, September 2012, Volume 62, Issue 1-4, pp. 59-67. 5. Eman A., Jun N. and etc. Programming spindle speed variation for machining tool chatter suppression / International Journal of Machine Tools and Manufacture, September 2003, Volume 43, Issue 12, pp. 1229-1240. 6. Andreas O., Günter R. Application of spindle speed variation for chatter suppression in turning / CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2013, Volume 6, Issue 2, pp. 102-109. 7. Alpay Y., Emad A. and etc. Machine Tool Chatter Suppression by multi-level random spindle speed variation / Journal of Manufacturing Science and Engineering, April 2002, Volume 124(2), pp. 208-216. 8. Афонина Н.А. Повышение виброустойчивости процесса токарной обработки на основе управляемых колебаний скорости резания / Автореферат дисс., к.т.н., Тула, 2004, 21с. 9. Афонина Н.А., Афонин А.А. и др. Способ подавления автоколебаний при токарной обработке / Патент, RU №2 267381 C1, опубл. 10.01.2006 Бюл. №01.

Bibliography (transliterated): 1. Inamura T., Sata T. Stability analysis of cutting under varying spindle speed / Ann. C.I.R.P., 1974, Volume 23, pp. 80-85. 2. Sexton J.S., Milne R.D. and etc. A stability analysis of single-point machining with varying spindle speed / Applied

Mathematical Modeling, September 1977, Volume 1, Issue 6, pp.310-318. 3. Jemielniak K., Widota A. Suppression of self-excited vibration by the spindle speed variation method / International Journal of Machine Tool Design and Research, January 1984, Volume 24 (3), pp.207-214. 4. Alberteli P., Musletti S. and etc. Spindle speed variation in turning: technological effectiveness and applicability to real industrial cases / International Journal of Advanced Manufacturing Technology, September 2012, Volume 62, Issue 1-4, pp. 59-67. 5. Eman A., Jun N. and etc. Programming spindle speed variation for machining tool chatter suppression / International Journal of Machine Tools and Manufacture, September 2003, Volume 43, Issue 12, pp. 1229-1240. 6. Andreas O., Günter R. Application of spindle speed variation for chatter suppression in turning / CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2013, Volume 6, Issue 2, pp. 102-109. 7. Alpay Y., Emad A. and etc. Machine Tool Chatter Suppression by multi-level random spindle speed variation / Journal of Manufacturing Science and Engineering, April 2002, Volume 124(2), pp. 208-216. 8. Afonina N.A. Povyshenie vibroustojchivosti processa tokarnoj obrabotki na osnove upravljajemyh kolebanij skorosti rezanija / Avtoreferat diss., k.t.n., Tula, 2004, 21s. 9. Afonina N.A., Afonin A.A. i dr. Sposob podavlenija avtokolebanij pri tokarnoj obrabotke / Patent, RU №2 267381 S1, opubl. 10.01.2006 Bjul. №01.

УДК 621.923

Ю. Г. ГУЦАЛЕНКО, Харків, Україна

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ВСКРЫТИЯ ЗЕРЕННЫХ МЕТАЛЛОПОКРЫТИЙ С УЛЬТРАДИСПЕРСНЫМИ АЛМАЗАМИ ПРИ АЛМАЗНО-ИСКРОВОМ ШЛИФОВАНИИ

Розглядається проблема ролі активізації металопокритих ріжучих алмазних зерен в електричному контакті шліфувального круга з оброблюваною заготовкою (алмазно-іскрове шліфування) у зв'язку з включенням до складу металопокриття порожнистих ультрадисперсних частинок з алмазною оболонкою. В основу представленого фізичного прогнозу особливостей розкриття такого металопокриття при алмазно-іскровому шліфуванні покладена аналогія з механізмом подавлення пір в технологіях електроконсолідації кераміки за методом спарк-плазмового спікання.

Рассматривается проблема ролевой активизации металлопокрытых режущих алмазных зерен в электрическом контакте шлифовального круга с обрабатываемой заготовкой (алмазно-искровое шлифование) в связи с включением в состав металлопокрытия полых ультрадисперсных частиц с алмазной оболочкой. В основу представленного физического прогноза особенностей вскрытия такого металлопокрытия при алмазно-искровом шлифовании положена аналогия с механизмом подавления пор в технологиях электроконсолидации керамики по методу спарк-плазменного спекания.

The problem of role activating of metal coating cutting grains in the electrical contact of the grinding wheel with the workpiece (diamond-spark grinding) is considered in connection with the including in the metal coating composition of the hollow ultradispersed particles with diamond shell structure. The analogy with the mechanism of the suppression of the pores in the ceramic technology of the electric consolidation by the method of spark-plasma sintering put as the basis of represented physical forecast to opening of such metal coating in the diamond-spark grinding.

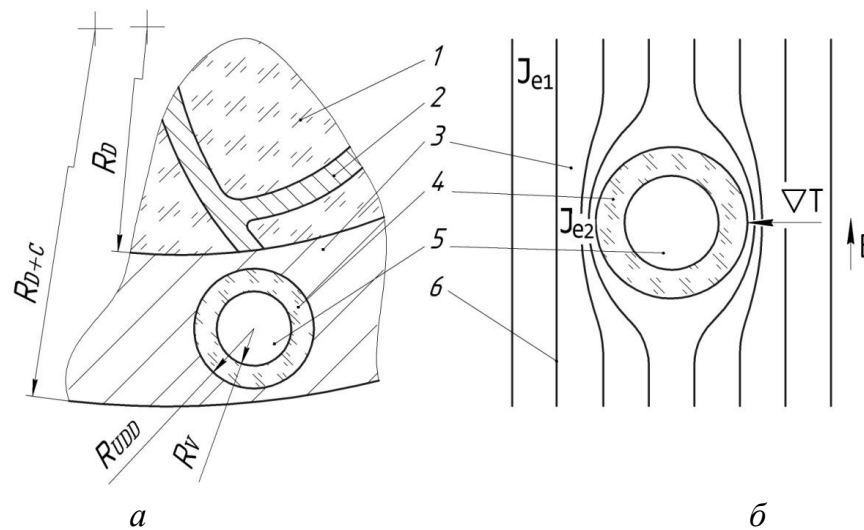
Введение. Металлическая защита поверхности синтезированных алмазных зерен, усиленная включением детонационных ультрадисперсных алмазов (УДА) в состав покрытия, способствует морфометрической сохранности зерен в доэксплуатационный отрезок их жизненного цикла. Известен опыт повышения эффективности алмазно-искрового шлифования (АИШ) кругами с исходной поверхностной металлизацией зерен из

сверхтвердых абразивов [1]. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования влияния степени износа и обновления режущего рельефа алмазного круга на устойчивость процесса и параметры операций АИШ указывают на определяющее влияние исходного размера, геометрии, прочности, износостойкости сверхтвердых зерен в составе алмазно-металлической композиции инструмента на его потенциальную работоспособность, интенсивность и ресурс рабочей эксплуатации. В НТУ «ХПИ» разработана практическая технология износостойкой металлизации алмазных зерен с введением УДА и получены данные о возможности прессования и спекания алмазно-металлических композиций рабочей части шлифовальных кругов с участием алмазных зерен под таким композитным покрытием без их разрушения [2]. Поэтому введение сверхтвердой составляющей в виде УДА в состав металлопокрытия алмазных зерен инструментов АИШ открывает новые перспективы в повышении ресурса шлифовальных кругов и технологических возможностей этого технологического метода высокопроизводительной финишной обработки.

Проблема и цель. Выступая в известной [3] роли мощного структурообразователя, на этапе инструментального производства заметно усиливающего функциональные свойства покрытия, УДА в его составе на зернах рабочей поверхности шлифовального круга в операционном технологическом использовании являются вместе с тем очагами повышенного износостойкого сопротивления вскрытию алмазной режущей основы зерен. Поскольку объемное содержание УДА в функционально защитном металлическом покрытии (не выше, чем чуть более 2 % [4]) в общем случае примерно в 3...25 раз уступает практикуемой объемной доле алмазов шлифовального порошка в составе алмазно-металлической композиции рабочей части инструмента (6,25 до 50 %), причем в наиболее распространенном (25 % – по данным крупных производителей и потребительского рынка, например представительства российского ОАО «Терекалмаз» в Республике Беларусь [5]) – на порядок, то вклад УДА металлопокрытия в сьем обрабатываемого материала уже поэтому не может быть существенным в сравнении с работой алмазной основы исходно металлопокрытых зерен.

Представленное исследование преследует цель показать принципиальные особенности и возможности эффективного эксплуатационного разрушения УДА под действием электрического тока в металле покрытия, выполнившего свою защитную функцию и требующего вскрытия в рабочих процессах управляемого АИШ для введения в процесс массового микрорезания алмазной режущей основы исходно металлопокрытых зерен.

Основная часть. В исследовании [6] впервые установлено, что УДА имеют тетрагональную кристаллическую решетку с параметрами $a = 0,3585$ нм и $c = 0,345$ нм, а морфологические образцы, полученные детонационным синтезом, представляют собой полые газонаполненные сферы частиц алмаза со средним внутренним радиусом оболочки $R_v = 1,894$ нм и с внешним $R_{udd} = 2,547$ нм (см. рисунок, а). Эти частицы, размером до 4-6 нм, кристаллизуются в алмазную фазу, одновременно спекаясь, образуя вторичную фрактальную структуру.



а – структурно-геометрическая схема;

б – тепло-электрофизическая схема

- 1 – синтетическое алмазное зерно;
- 2 – остаточные металлоструктуры каталитического синтеза алмазов;
- 3 – металлопокрытие алмазного зерна;
- 4 – алмазная оболочка УДА;
- 5 – газонаполненная полость УДА;
- 6 – силовые линии электрического поля

Рисунок – УДА в металлопокрытии алмазного зерна инструмента АИШ

Из размерности УДА следует нецелесообразность их целевого использования как режущих зерен шлифовальных кругов производительных процессов финишной механической обработки даже при стандартных объемных содержаниях в составе их алмазонасного слоя. Так, ориентируясь на средний размер и сферическую интерпретацию единичного УДА (рис. *a*), допущение минимально примерно половинной от него заделки в связке для максимально выступающей частицы и известный критерий Крагельского осуществимости процесса микрорезания из соотношения глубины внедрения в обрабатываемый материал и радиуса округления рабочей части режущего элемента (на практике $0,1 \dots 0,5$ [7]), возможная толщина единичного среза попадает в интервал $0,6 \dots 2,5$ нм. В то же время современная практика эффективного микрорезания синтетическими алмазными абразивами, зерна которых в сферической модельной интерпретации с радиусом R_D могут служить функциональной основой исходно металлопокрытого единичного инструментального режущего элемента радиусом R_{D+C} (рис. *a*), даже при обработке особо труднообрабатываемого монокристалла вольфрама в реконструкциях условий АИШ указывает на толщины единичных срезов до 3 мкм [8].

Ролевая активизация режущих алмазных зерен в электрическом контакте шлифовального круга с обрабатываемой заготовкой в связи с их металлопокрытием соответствует успешно апробированной концепции АИШ с введением в зону резания дополнительной энергии постоянного электрического тока [9], причем с мягкими электрическими режимами возбуждения электрических разрядов по механизму скользящих электрических контактов [10].

Конечный продукт детонационного синтеза УДА содержит углерод (от 84,0 до 89,0 масс. %), водород (от 0,3 до 1,1 масс. %), азот (от 3,1 до 4,3 масс. %), кислород (от 2,0 до 7,1 масс. %) [11]. Газовую среду содержат внутренние и межчастичные закрытые полости. Кроме того, термодесорбционный масс-спектральный анализ выявляет газовыделение продуктов окисления атомов углерода на поверхности УДА, происходящего вследствие взаимодействия с газовой средой взрывной камеры.

Можно предположить, что при АИШ (например, с организацией токоподвода в зону резания по схеме [9]) протекание электрического тока в объеме металлопокрытия алмазного зерна будет сопровождаться интенсификацией плотности электрического поля с некоторой напряженностью E вокруг полых наночастиц УДА, влекущих нарушение однородности электрического поля в зоне УДА и возникновение градиента температуры ∇T вследствие изменения плотности тока ($J_{e2} > J_{e1}$, рис. б), и воспринимаемых аналогично порам в технологиях электроконсолидации керамики под давлением по методу спарк-плазменного спекания, или SPS (spark-plasma sintering) в зарубежной терминологической практике [12], с повышенной вероятностью электроразрядной атаки таких частиц, инициацией в них озона, реализующего повышенную окислительную активность захватом углерода, и т. д. [13]. К впервые показанной автором возможности этой цепочки химических трансформаций в электроразрядных технологиях вольфрамокарбидной керамики проявляют практический интерес и другие исследователи [14].

В аналитико-синтетических конструкциях общей картины искрово-разрядных проявлений АИШ с участием металлопокрытых алмазных зерен, содержащих УДА в составе покрытия, не следует, по-видимому, исключать и возможности возникновения известных в природе газовоздушных сред локальных полей статического электричества, энергия которых может освобождаться посредством искровых разрядов [15], с адресацией этой возможности невакуумированным закрытым пространствам под алмазной оболочкой УДА с постразрядной механической деформацией и разрушением последней.

Конечный продукт в конвенциональных технологиях синтеза УДА в металлических камерах, помимо неалмазной фазы латентного углерода [16] и газовой составляющей, содержит результаты взаимодействия продуктов детонации со стенками камеры, обычно стальной. Исследование [6] конденсированных продуктов взрыва, полученных при детонации зарядов взрывчатых веществ, состоящих из сплава 1,3,5-тринитротолуола с циклотриметилентринитрамином и подорванных в атмосфере продуктов предыдущего взрыва такого же заряда, показало содержание несгораемых примесей оксида Fe(III), карбида железа и α -железа в пределах 4,2-6,5 %,

со следующим распределением интенсивностей в спектре среди железосодержащих примесей: вклад линии α -железа составляет 29-43 %, магнетита – 36-48 %, отдельных ионов Fe(III) – 16-27 % [6]. Конечно, конкретика этих результатов соответствует условиям исследований [6] (объем взрывной камеры 3,05 м², содержание кислорода в ней – до 6 объёмн. %; масса заряда – 0,65 кг; температура стенок камеры – до 363 К; соотношение масс конденсированных продуктов детонации взрывчатых веществ – 9 (тринитротолуол) : 1 (гексаген), при 8 масс.% алмазной нанопазы; и др.). Однако структура и порядок значений полученных данных позволяют предполагать кардинальное изменение условий токопроводности в наноалмазных оболочках, в условиях АИШ располагающих к их электроразрядной очистке подобно [17], возможно со скольжением разряда по границам [18].

Размерная оценка морфометрии вторичных фрактальных структур УДА не превышает 10 нм, а по исходной морфологической оценке соотношение средних размеров алмазной стенки и всей частицы в интерпретации экспериментальных данных [6] сферической моделью составляет практически 1:4. Простое соотношение габаритной размерной оценки фрактальных структур УДА (менее 10 нм) и нижней границы зернистости порошков синтетических алмазов в рекомендательной практике шлифовальных кругов на металлических связках (40 мкм, по базовому стандарту для алмазных порошков любого генезиса [19] и его развернутому переложению в синтетической части [20]) составляет менее 1:1000. Следовательно, для деградации износостойкости композитного металлопокрытия алмазных зерен аллотропной трансформацией входящих в его состав УДА можно использовать перегрев всплесками электрического тока (например, электроразрядными) до известной температурной зоны графитизации (примерно от 1000 °С для УДА, [21]), по времени воздействия в полном объеме разрушительно критичной только для ультрадисперсных алмазных фрагментов детонационной природы. При этом сверхтвердой сохранности алмазных зерен шлифовального порошка в нисходящей части такой тепловой перегрузки будет способствовать существенно более высокая мощность сброса тепла синтетическими алмазами (примерно 600 Вт/(м·К) [22]) по

сравнению с содержащей их металлической матрицей связки шлифовального круга (для наиболее типичных марок на медно-оловянной или медно-алюминиево-цинковой основе – примерно 20...40 Вт/(м·К) [23]) в близком к графитизации алмаза температурном интервале.

В отличие от АИШ кругами без исходного металлопокрытия режущих зерен, в рассматриваемом случае операционного скользящего электрического контакта металлопокрытия зерна и обрабатываемого, также токопроводного материала, потенциальная энергоемкость электрических разрядов существенно понижена. Поэтому эрозионное разрушение металлопокрытия алмазного зерна (и металлической связки круга в скольжении с обрабатываемым материалом) происходит значительно менее интенсивно. Из этого следует невысокая вероятность выпадения неизношенных частиц УДА в результате единичного электрического разряда в скользящем контакте между металлопокрытием зерен шлифовального порошка и обрабатываемым материалом. Поэтому принятие во внимание и использование рассмотренных выше технологических возможностей АИШ в эксплуатационном освобождении зерен круга от металлопокрытия с УДА является важным дополнительным источником повышения эффективности обработки инструментами из сверхтвердых абразивов с доэксплуатационно сохраненной исходной целостностью единичных зерен.

Заключение. Электрофизические особенности АИШ предоставляют возможность повышения эффективности эксплуатации инструмента с металлопокрытием сверхтвердых абразивных зерен, включающим УДА для повышения функциональной надежности сохранения исходной целостности зерен при прессовании и спекании алмазно-металлических композиций.

Эти возможности позволяют интенсифицировать освобождение сверхтвердой основы режущих зерен от выполнившего свою предварительную защитную функцию металлического покрытия. Это осуществляется путем деактивации мест расположения УДА как очагов повышенной износостойкости, повышающих сопротивляемость такого покрытия вскрытию.

Природа этих возможностей является электрической и заключена, во-первых, в интенсификации плотности электрического поля вокруг нетокопроводных полых наночастиц УДА, способствующей электроразрядной атаке и механической деформации с разрушением этих наночастиц. Во-вторых, в допустимости кратковременного электрического импульсного нагрева, достаточной мощности и длительности для понижающей износостойкость графитизации алмазной несущей основы оболочечной конструкции УДА.

Список использованных источников: 1. *Малыхин, В. В.* Повышение эффективности шлифования вольфрамсодержащих твердых сплавов совместно со сталью алмазными кругами : Дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 – процессы мех. и физ.-хим. обработки, станки и инструмент / *В. В. Малыхин*; Харьков. политехн. ин-т. – Харьков, 1985. – 262 с. 2. *Бабенко, Е. А.* Повышение работоспособности алмазных кругов на полимерных и керамических связках : Дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты / *Е. А. Бабенко*; Нац. техн. ун-т «Харьк. политехн. ин-т». – Харьков, 2014. – 203 с. 3. *Барабошкин, К. С.* Исследование процесса формирования текстуры детонационных наноалмазов для разработки и создания высокоэффективных композиционных материалов : Дис. ... канд. техн. наук : 05.17.06 – технология и переработка полимеров и композитов / *К. С. Барабошкин*; Федерал. гос. унитар. предприятие «Федерал. науч.-произв. центр “Алтай”». – Бийск, 2006. – 136 с. 4. *Козуб, П. А.* Спосіб одержання композиційного матеріалу на основі хімічно осадженого нікелю та нанодисперсних алмазів : патент на корисну модель № 72585 Україна : МПК С23С 16/00, С23С 20/00, С23С 30/00 / *П. А. Козуб, О. Я. Лобойко, Г. І. Гринь, Т. А. Довбій, Є. О. Бабенко, Г. М. Резніченко, Л. В. Мухіна, Л. М. Бондаренко*; власник : Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». – № u 2012 00854; заявл. 27.01.12; опубл. 27.08.12, Бюл. №16. 5. ОАО «Терский завод алмазного инструмента» : представительство в Республике Беларусь [Официальный сайт ; Минск, Беларусь]. – Режим доступа : <http://www.terekalmaz.by>. Дата обращения: 15.06.2015. 6. *Верещагин, А. Л.* Синтез и свойства тугоплавких неорганических соединений и фаз, полученных в режимах горения и детонации газовыделяющих конденсированных составов : Дис. ... д-ра хим. наук : 02.00.04 – физическая химия / *А. Л. Верещагин*; Бийск. технологич. ин-т (фил.) Алт. гос. техн. ун-та. – Бийск, 2004. – 248 с. 7. *Семко, М. Ф.* Основы алмазного шлифования / *М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, А. Ф. Раб, М. Д. Узунян, М. С. Пивоваров*. – Киев : Техніка, 1978. – 192 с. 8. *Стрельчук, Р. М.* Исследование и анализ процесса микрорезания наноструктурных твердых сплавов / *Р. М. Стрельчук, Д. С. Стороженко, М. Д. Узунян* // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. – Вып. 83. – С. 255-263. 9. *Фадеев, В. А.* Алмазное шлифование твердых сплавов с введением в зону резания дополнительной энергии постоянного тока : Дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты / *В. А. Фадеев*; Харьк. гос. политехн. ун-т. – Харьков, 1995. – 273 с. 10. *Намитоков, К. К.* Электроэрозионные явления : Монография / *К. К. Намитоков*. – М. : Энергия, 1978. – 456 с. 11. *Верещагин, А. Л.* Свойства детонационных наноалмазов / *А. Л. Верещагин*. – Барнаул : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2005. – 134 с. 12. *Геворкян, Э. С.* Особенности и

место электроконсолидации прямым действием переменного тока в системе методов субмикро- и нанопорошкового спекания под давлением / Э. С. Геворкян, Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т». Темат. вип.: Технології в машинобудуванні. – 2010. – № 49. – С. 144-161. 13. Геворкян, Э. С. Генезис экспансии семиркарбида вольфрама в вольфрамокерамических инструментальных композитах горячего прессования с электроконсолидацией нанопорошков на монокристаллической основе / Э. С. Геворкян, Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т». Темат. вип.: Технології в машинобудуванні. – 2010. – № 53. – С. 19-30. 14. Гойда, Э. Ю. Синтез композиционных карбидсодержащих медных сплавов воздействием на жидкую матрицу низкочастотными колебаниями : Дис. ... канд. хим. наук : 02.00.04 – физическая химия / Э. Ю. Гойда; Ин-т металлургии УрО РАН. – Екатеринбург, 2015. – 127 с. 15. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – М. : Наука, 1992. – 536 с. 16. Возняковский, А. П. Экологические проблемы получения детонационных нанодIAMONDS. Поверхность и функционализация / А. П. Возняковский, Ф. А. Шумилов, А. Х. Ибатуллина, И. В. Шугалей // Экологическая химия. – 2012. – Т. 21, № 3. – С. 164-167. 17. Guicciardi, S. Composition dependence of mechanical and wear properties of electroconductive ceramics / S. Guicciardi // Порошковая металлургия. – 1999. – №3-4. – С. 32-41. 18. Бакишин, В. К. Особенности скользящего разряда по границе раздела диэлектриков с различной диэлектрической проницаемостью / В. К. Бакишин, Г. П. Кузьмин, И. М. Минаев, А. А. Рухадзе, Н. Б. Тимофеев // Прикладная физика. – 2005. – № 6. – С. 54-59. 19. ГОСТ 9206-80. Порошки алмазные. Технические условия. Введ. 01.07.1981. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 17 с. 20. ДСТУ 3292-95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. Увед. 01.01.97. – К.: Держспоживстандарт України, 1997. – 151 с. 21. Рябкова, Н. Л. Синтетические ультрадисперсные алмазы (УДА) – материалы XXI века [электрон. ресурс] / Н. Л. Рябкова, Е. В. Никитин // Полярное сияние : междунар. студенч. науч. конф. [Сайт] : Ядерное будущее : безопасность, экономика и право : VI междунар. студенч. науч. конф., Санкт-Петербург, 31 янв. – 6 февр. 2003 г. – Режим доступа : http://www.polar.mephi.ru/ru/conf/2003/predloj/rjabk_tr.htm. Дата обращения: 15.06.2015. 22. Синтетические сверхтвердые материалы / В 3-х т. Редкол. : Н. В. Новиков (отв. ред.) и др. – Т. 1 : Синтез сверхтвердых материалов. – К. : Наук. думка, 1986. – 264 с. 23. Галицкий, В. Н. Алмазно-абразивный инструмент на металлических связках для обработки твердого сплава и стали / В. Н. Галицкий, А. В. Курищук, В. А. Муровский. – К. : Наук. думка, 1986. – 144 с.

Bibliography (transliterated): 1. Malyhin, V. V. *Povyshenie jeffektivnosti shlifovaniya vol'framosoderzhashhih tverdyh splavov so stal'ju almaznymi krugami*. Dys. ... kand. tehn. nauk. Kharkov, 1985. Print. 2. Babenko, E. A. *Povyshenie rabotosposobnosti almaznyh krugov na polimernyh i keramicheskikh svyazkah*. Dys. ... kand. tehn. nauk. Kharkov, 2014. Print. 3. Baraboshkin, K. S. *Issledovanie processa formirovaniya tekstury detonacionnyh nanoalmazov dlja razrabotki i sozdaniya vysokojeffektivnyh kompozicionnyh materialov*. Dys. ... kand. tehn. nauk. Biysk, 2006. Print. 4. Kozub, P. A., et al. *Sposib oderzhannja kompozicionnogo materialu na osnovi himichno osadzenogo nikelju ta nanodispersnih almaziv*. Patent UA No. 72585. IPC C23C 16/00, C23C 20/00, C23C 30/00. u 2012 00854. Appl. 27.01.2012. Publish. 27.05.2013, Bull. No.16. Print. 5. *Public Corporation "Terskij zavod almaznogo instrumenta"*, Mission in the Republic of Belarus. Minsk, Belarus. Web. 15 June 2015 <<http://www.terekalmaz.by>>. 6. Vereshhagin, A. L. *Sintez i svojstva tugoplavkih neorganicheskikh soedinenij i faz, poluchennyh v rezhimah*

gorenija i detonacii gazovydeljajushhih kondensirovannyh sostavov. Dis. ... d-ra him. nauk. Biysk, 2004. Print. **7.** Semko, M. F., et al. *Osnovy almaznogo shlifovanija*. Kiev: Tehnika, 1978. Print. **8.** Strel'chuk, R. M., D. S. Storozhenko and M. D. Uzunjan "Issledovanie i analiz processa mikrorezanija nanostrukturnyh tverdyh splavov". *Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb.* Kharkov: NTU "KhPI", 2013. Iss. 83: 255-263. Print. **9.** Fadeev, V. A. *Almaznoe shlifovanie tverdyh splavov s vvedeniem v zonu rezanija dopolnitel'noj jenergii postojannogo toka*. Dys. ... kand. tehn. nauk. Kharkov, 1995. Print. **10.** Namitokov, K. K. *Jelektroerozionnye javlenija: Monografija*. Moscow: Энергия, 1978. Print. **11.** Vereshhagin, A. L. *Svojstva detonacionnyh nanoalmazov*. Barnaul: Altai State Technical University Press, 2005. Print. **12.** Gevorkyan, E. S., and Yu. G. Gutsalenko. "Osobennosti i mesto jelektrokonsolidacii prjamym dejstviem peremennogo toka v sisteme metodov submikro- i nanoporoshkovogo spekanija pod davleniem." *Visnyk NTU "KhPI"*. No. 49. 2010. 144–161. Print. **13.** Gevorkyan, E. S., and Yu. G. Gutsalenko. "Genezis ekspansii semikarbidu volframa v volframokeramicheskikh instrumentalnyh kompozitah goryachego pressovaniya s jelektrokonsolidaciey nanoporoshkov na monokarbidnoy osnove." *Visnyk NTU "KhPI"*. No. 53. 2010. 19–30. Print. **14.** Gojda, Je. Ju. *Sintez kompozicionnyh karbidsoderzhashhih mednyh splavov vozdejstviem na zhidkuju matricu nizkochastotnymi kolebanijami*. Dis. ... d-ra him. nauk. Yekaterinburg, 2015. Print. **15.** Rajzer, Ju. P. *Fizika gazovogo razrjada*. Moscow: Nauka, 1992. Print. **16.** Voznjakovskij, A. P., et al. "Jekologicheskie problemy poluchenija detonacionnyh nanoalmazov. Poverhnost' i funkcionalizacija". *Jekologicheskaja himija*. Vol. 21 (2012), No. 3: 164-167. Print. **17.** Guicciardi, S. "Composition dependence of mechanical and wear properties of electroconductive ceramics". *Poroshkovaja metallurgija*. 1999. No. 3-4: 32-41. Print. **18.** Bakshin, V. K., et al. "Osobennosti skol'zjashhego razrjada po granice razdela dijelektrikov s razlichnoj dijelektricheskoy pronicaemost'ju". *Prikladnaja fizika*. 2005. No. 6: 54-59. Print. **19.** GOST 9206-80. *Poroshki almaznye. Tehnicheskie uslovija*. Moscow: Izd-vo standartov, 1989. Reprint. **20.** DSTU 3292-95. *Poroshki almazni sintetichni. Zagal'ni tehnicni umovi*. Kiev: Derzhspozhivstandart Ukraïni, 1997. Reprint. **21.** Rjabkova, N. L., and E. V. Nikitin. "Sinteticheskie ul'tradispersnye almazy (UDA) – materialy XXI veka". *Poljarnoe sijanie: mezhdunar. studench. nauch. konf. Jadernoje budushhee : bezopasnost', jekonomika i pravo: VI mezhdunar. studench. nauch. konf. Sankt-Peterburg, 31st Jan. – 6th Feb. 2003*. Web. 15 June 2015 <http://www.polar.mephi.ru/ru/conf/2003/predloj/rjabk_tr.htm>. **22.** *Sinteticheskie sverhtverdye materialy, 3 vols. Vol. 1: Sintez sverhtverdyh materialov*. Ed. by H. B. Новиков. Kiev: Hayk. dumka, 1986. Print. **23.** Galickij, V. N., A. V. Kurishhuk and V. A. Murovskij. *Almazno-abrazivnyj instrument na metallicheskih svjazzkah dlja obrabotki tverdogo splava i stali*. Kiev: Nauk. dumka, 1986. Print.

УДК 621.923

Л.П. КАЛАФАТОВА, д-р техн. наук, Красноармейск, Украина

Д.В. ПОКОЛЕНКО, канд. техн. наук, Константиновка, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ НА КАЧЕСТВО ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СИТАЛЛОВ

Запропоновано підхід до розробки математичної моделі формування дефектного шару в процесі алмазного шліфування деталей із ситалів. При експериментальному моделюванні контакту алмазного зерна з оброблюваною поверхнею встановлено, що з підвищенням динамічної дії на неї підвищується інтенсивність дефектоутворення, що негативно вплине на міцність виробів із ситалів.

Предложен подход к разработке математической модели формирования дефектного слоя в процессе алмазного шлифования деталей из ситалла. При экспериментальном моделировании контакта алмазного зерна с обрабатываемой поверхностью установлено, что с увеличением динамического воздействия на нее возрастает интенсивность дефектообразования, что отрицательно скажется на прочностных свойствах изделий из ситаллов.

An approach to the development of a mathematical model of the formation of the defect layer in the process of diamond grinding of glass-ceramic pieces. Experimental modeling of diamond grain contact with the treated surface showed that the intensity of defects increases with increasing of the dynamic effects. This will affect the strength of ceramics products.

Введение

Повышение эффективности механической обработки, прежде всего за счет обеспечения высокого качества формируемой поверхности и, как следствие, выпускаемой продукции, является одним из основных направлений развития современного машиностроения. Известны основные технологические способы повышения качества обработки изделий машиностроения [1], включающие виды, схемы и режимы обработки, характеристики режущих инструментов, свойства используемых

© Л.П. Калафатова, Д.В. Поколенко, 2015

технологических сред, динамическое состояние элементов технологической системы резания и т.д. При обработке различных по физико-механическим свойствам конструкционных материалов изменяются приоритеты в использовании тех или иных способов повышения качества обрабатываемой поверхности.

На современном этапе развития науки и техники существует тенденция повышения объема производства изделий из хрупких неметаллических материалов (ХНМ), которые все более широко заменяют металлы во многих отраслях промышленности. К этим материалам, прежде всего, относятся различные виды технической керамики, включая стеклокристаллическую керамику – ситаллы.

Однако рост применения ХНМ в качестве конструкционных материалов сдерживается по причине трудностей, возникающие при обеспечении высокой точности и качества поверхности изделий при механической обработке, которая, в основном, осуществляется алмазными абразивными инструментами. Это связано, с одной стороны, с высокими показателями прочности и повышенной хрупкостью материалов рассматриваемого класса, с другой стороны – с неэффективными технологическими процессами обработки, причиной которых в значительной мере является недостаточный объем знаний о механизмах формирования качественного поверхностного слоя изделий при алмазном шлифовании. Установлено, что даже мягкие режимы шлифования приводят к созданию дефектного слоя – сетки микротрещин, которые расположены на поверхности обрабатываемых материалов и распространяются в глубину на 200 – 700 мкм для ситаллов и до 50 мкм для конструкционной керамики. Все это является причиной снижения механической прочности изделий или требует дополнительных, трудоемких операций, связанных с необходимостью удаления дефектного слоя.

На структуру поверхностного слоя деталей вместе с пористостью и размерами кристаллов самого обрабатываемого материала влияют, как было сказано выше, также технологические условия обработки: схема и режимы шлифования, состав технологических сред, характеристики алмазных кругов, изменяющие силовой, динамический и температурный режимы процесса резания. Поэтому выбор перечисленных параметров

необходимо осуществлять в строгой зависимости от требуемого качества изделий и свойств заготовки, используя знания об их влиянии на условия процесса шлифования, интенсивность развития нарушенного обработкой слоя деталей. В современной литературе такие данные практически отсутствуют, особенно по вопросам, касающимся температурных и динамических характеристик процесса резания.

Наличие дефектного или трещиноватого слоя характерно для всех видов абразивной обработки ХНМ (шлифования свободным абразивом, абразивными и алмазными кругами, механического полирования) [2]. Глубина дефектного слоя зависит от интенсивности процессов диспергирования, уменьшаясь от черновых к чистовым операциям обработки. При этом сформированный дефектный слой кардинальным образом влияет на эксплуатационные свойства изделий из хрупких материалов и, прежде всего, на их прочность [3]. Несовершенства ТП обработки, сопровождающиеся появлением вибраций в системе резания в сочетании с повышенным динамическим силовым воздействием на обрабатываемую поверхность (особенно на операциях чернового шлифования), приводят к появлению развитого приповерхностного дефектного слоя [4]. Глубина его проникновения может достигать более 300 мкм, что отрицательно сказывается на трудоемкости последующих доводочных операций, а в случае неполного удаления дефектов, может сопровождаться разрушением изделий при эксплуатации.

Для обеспечения эксплуатационных характеристик изделий необходимо иметь четкое представление о влиянии входных параметров ТП обработки изделий из ситаллов, в том числе динамического фактора, на показатели дефектности, прежде всего, на глубину и структуру нарушенного обработкой слоя. Исследование закономерностей формирования дефектного слоя в изделиях из ситаллов предполагает разработку экспериментально-аналитической модели развития дефектного слоя при их шлифовании с учетом влияния силового и динамического воздействий на формируемую поверхность. Это позволит регламентировать технические требования к элементам технологической обрабатывающей системы и выбрать рациональные условия обработки при изготовлении определенных изделий.

Абразивное диспергирование ХНМ непосредственно связано с механизмами деформации и разрушения в поверхностном слое, поскольку оно сопровождается локальной деформацией и отрывом частиц. Для изучения процессов абразивного диспергирования используются методы моделирования отдельных фаз этих процессов (статическое воздействие - вдавливание, скольжение или перекатывание по поверхности) на примере взаимодействия индентора определенной формы (модели абразивного зерна) с обрабатываемой поверхностью [5]. Для большего приближения исследуемой модели к реальным процессам резания при шлифовании необходимо кроме статического вдавливания зерен учесть также их динамическое, ударное воздействие на формируемую поверхность, вызывающее колебания в зоне микрорезания, которые генерируют ударные волны, распространяющиеся в заготовке и алмазном зерне [5, 6], и влияют на развитие дефектного слоя в ОМ.

Целью настоящей работы является проведение комплекса исследований по определению степени влияния динамического воздействия на развитие дефектного слоя в ситалле при приложении к его поверхности ударной сосредоточенной нагрузки, что послужит основой для разработки модели развития дефектного слоя при шлифовании ситаллов с учетом влияния силового и динамического факторов.

Основное содержание работы

Для моделирования влияния ударного воздействия алмазного зерна на формирование дефектного слоя в ситалле были проведены экспериментальные исследования, связанные с определением влияния ударного воздействия зерна-индентора в виде стального шарика на формирование дефектного слоя в ситалле. Эксперимент проводился в условиях лаборатории научно-производственного отдела Константиновского государственного научно-производственного предприятия «Кварсит».

Образцы из ситалла АС-418 размерами 60х60х15 мм устанавливались на предметный столик приспособления, а стальные шарики диаметром $D\ 19$ и $D\ 20,5$ мм (массой, соответственно, 0,028 и 0,039 кг) – на электромагнитную плиту. После отключения электромагнита осуществлялся контакт шариков с поверхностью образцов при их падении с

высоты h : 400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400 мм. Картина развития дефектов в исследуемых образцах после удара определялась с помощью метода люминесцентной дефектоскопии в сочетании с послойным химическим травлением образцов с шагом 10 мкм. Наблюдение за послойным развитием дефектного слоя осуществлялось, начиная от исходной поверхности образца (зона контакта образца с шариком) до поверхности, соответствующей отсутствию дефектного слоя, образовавшегося в результате удара.

По результатам наблюдений обнаружено возникновение трещиноватого слоя в зоне контакта на ситалловых образцах, подвергшихся удару шариками обеих масс при их падении с высоты 2000 - 2400 мм. При этом на поверхности образцов образуется система круговых (кольцевых) трещин, распространяющихся вглубь материала, также как и при статической нагрузке [7]. На поверхности образца остается остаточный отпечаток радиусом a , величина которого зависит от диаметра шарика, его массы и высоты падения, определяющих внесенную в образец кинетическую энергию при ударе (таблица). В таблице y/a – относительное расстояние распространения кольцевых трещин, вызванных ударом.

Таблица – Характеристики зоны контакта шарика и образца ситалла

№ образца	Высота падения шарика h , м	Масса шарика m , кг	Радиус отпечатка, a , мм	Радиус круговой трещины:		Кинетическая энергия падения шарика E_k , Дж	y/a
				максимальный y_2 , мм	минимальный y_1 , мм		
1	2,0	0,028	0,462	0,640	0,465	0,55	1,0 - 1,4
2	2,0	0,039	0,681	1,092	0,834	0,76	1,2 - 1,6
3	2,4	0,039	0,737	1,103	0,940	0,91	1,2 - 1,5

На рис. 1 показана схема формирования трещиноватого слоя в образце при ударе шариком, имитирующем действие алмазного зерна. Поверхностные трещины сначала распространяются вертикально, а потом поворачиваются, образуя конические трещины Герца.

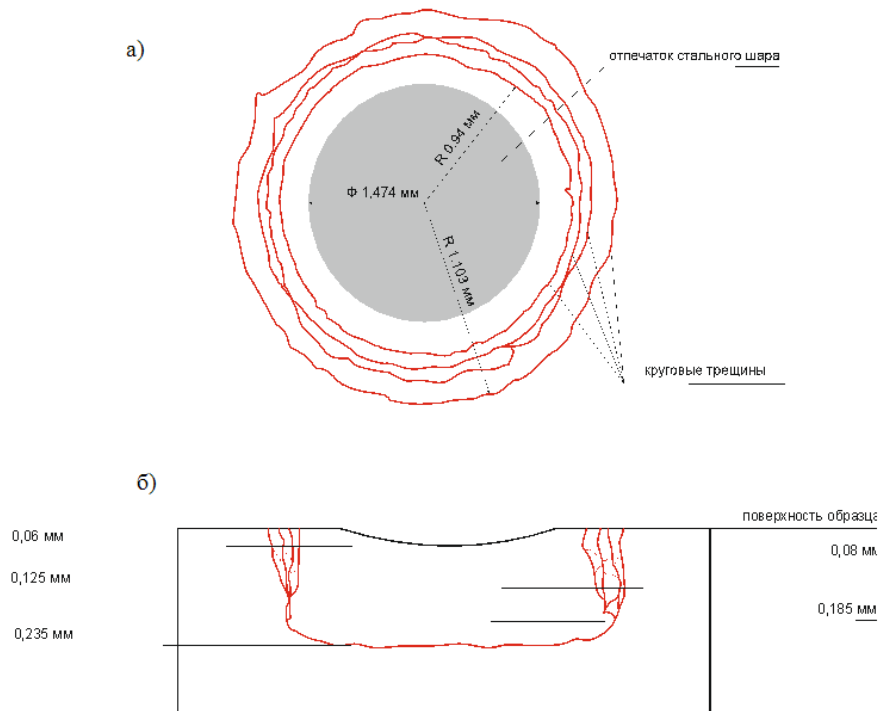


Рисунок 1 – Схема формирования трещиноватого слоя в ситалловом образце после удара:

- а – возникновение круговых трещин на поверхности образца;
б – распространение круговых трещин в глубину материала образца на различных уровнях залегания

На рис. 2 показана дефектность ситаллового образца, образованная в результате удара, на разных глубинах залегания от поверхности. При ударном воздействии рост, слияние трещин и образование обломков выкрашивания, которое происходит в основном в центре контакта под отпечатком, происходят одновременно в различных точках материала [8].

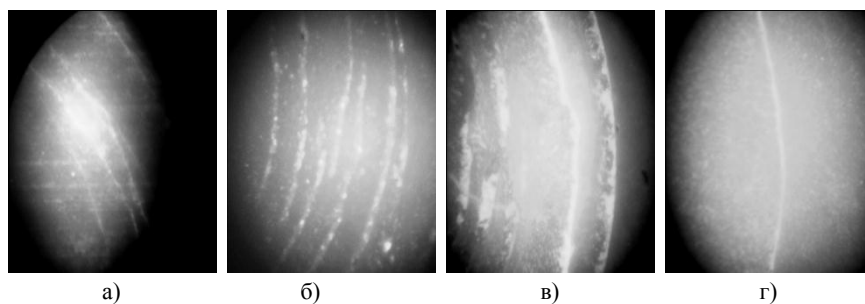


Рисунок 2 – Дефектность образца ситалла АС-418, сформированная в результате ударного воздействия шариком с кинетической энергией $E_k=0,548$ Дж, на различных глубинах залегания: а – 0 мкм; б – 30 мкм; в – 130 мкм; г – 220 мкм (увеличение $\times 100$)

Конические трещины образуются не только с поверхности, но и из зоны под пятном контакта. Это приводит к увеличению на определенной глубине, соответствующей 30...60 мкм, числа конических трещин (см. рис. 2, фотографии а и б). На глубине залегания порядка 60-80 мкм происходит разветвление круговых трещин на более мелкие, которые и образуют трещиноватый слой из мелких дефектов, соединяющихся между собой.

При ударе стальным шариком наиболее дефектный слой располагается на глубине от 30 до 160 мкм. Дефектность ситалла зависит от высоты падения шарика, его диаметра и массы, что определяет кинетическую энергию, вносимую в поверхностный слой образца при ударе. Критическое значение кинетической энергии, при которой происходит образование круговых трещин, составило 0,5 Дж. С увеличением энергии возрастают количество круговых трещин, их диаметр, относительное расстояние их распространения от центра пятна контакта y/a , достигающее в рассматриваемых условиях величины 1..1,6. Увеличивается также количество трещин в слое исследуемого образца на глубине 30...160 мкм. Максимальная глубина проникновения трещин также возрастает (рис. 3).

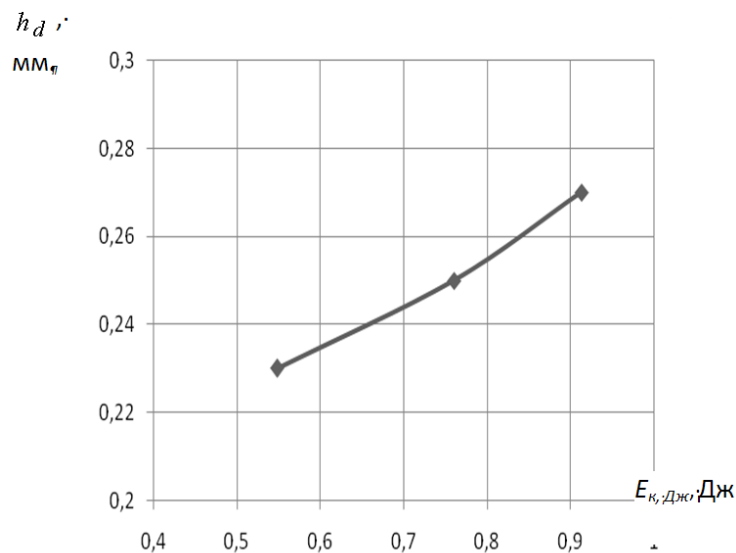


Рисунок 3 – Влияние энергии удара стального шарика по ситалловому образцу на максимальную глубину проникновения дефектов-трещин

При превышении энергии удара уровня 1,0 Дж на границе круговых трещин образуются радиальные трещины, которые приводят к разрушению образца.

Таким образом, можно заключить, что с увеличением энергии, внесенной в поверхностный слой при ударе металлического шарика по образцу из ситалла, имитирующего работу алмазного зерна, происходят увеличение глубины и ухудшение структуры его дефектного слоя. При этом при ударе шариком в поверхностном слое образца образуются в основном трещины Герца. Зависимость максимальной величины напряжения, возникающего в ОМ и приводящего к его разрушению при резании, от амплитуды колебаний A , силы прижима F и радиуса округления абразивных зерен R , согласно [9], имеет вид

$$\sigma_{\max} = 2,9n^{0,3}\eta^{0,3}A^{0,45}F^{0,7}R^{0,35}, \quad (1)$$

где n - число зерен абразива, приходящихся на единицу площади торца инструмента; η - постоянная, зависящая от свойств абразива и материала детали.

При вдавливании зерна-шарика и достижении максимальной величины силы прижима F , вызывающей максимальное напряжение $\sigma_{\max}$, на поверхности появляется круговая трещина диаметром

$$d = 2,2 \cdot \sqrt[3]{\frac{RF}{E}}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости обрабатываемого материала.

При колебательном движении зерна в процессе абразивной обработки, соответствующем входу - выходу его из контакта с формируемой поверхностью, происходит образование трещин, ориентированных практически параллельно обрабатываемой поверхности. Пересечение радиальных трещин с боковыми трещинами приводит к образованию сколов. При этом радиус образовавшейся трещины l может быть определен следующей зависимостью [9]

$$l = 3 \sqrt[3]{\left(\frac{E_k^2}{(dK_{ID})^2} \right)}, \quad (3)$$

где K_{ID} - коэффициент интенсивности напряжений обрабатываемого материала.

Заклучение

В представленной работе было установлено, что с увеличением энергии, внесенной в поверхностный слой как при ударе металлического шарика по образцу из ситалла, так и при алмазном шлифовании, происходит ухудшение структуры дефектного слоя изделий. С увеличением энергии удара, имитирующей действие вибраций в технологической системе обработки, обусловленных, например, несбалансированностью шлифовального круга, происходит увеличение глубины дефектного слоя. С увеличением динамического воздействия возрастает как глубина распространения дефектного слоя, так и интенсивность дефектообразования на большей глубине, что отрицательно скажется на прочностных свойствах изделий из ситаллов.

Список использованных источников: 1. *Суслов А.Г.* Качество поверхностного слоя деталей машин / *А.Г. Суслов* – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с. 2. *Гусев В.В.* Обеспечение эксплуатационных характеристик изделий из конструкционной керамики на стадии их производства / *В.В. Гусев, Л.П. Калафатова* // Сучасні технології у машинобудуванні. / [заг. ред. А.І. Грабченко] – Харків: НТУ «ХПІ», Т2. – 2006. – С. 334-346. 3. *Калафатова Л.П.* Особливості механічної обробки виробів із крихких неметалевих матеріалів / *Л.П. Калафатова* // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Зб. наук. праць. – Житомир: ЖДТУ, 2007. – Вип. 5: к 2-х ч. – Ч. 1. – С. 72-87. 4. *Калафатова Л.П.* Особливості механічної обробки виробів із крихких неметалевих матеріалів / *Л.П. Калафатова*. // Процеси механічної обробки в машинобудуванні – 2007. – Вип. 5: в 2-х ч. – Ч. 1. – С. 72-87. 5. *Ардамацкий А.Л.* Алмазная обработка оптических деталей. / *А.Л. Ардамацкий* – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1978. – 232 с. 6. *Чмир М.Я.* Взаимосвязь технологических показателей алмазно-электрохимического шлифования, характеристик оборудования и условий обработки / *М.Я. Чмир, Н.А. Троцкий* // Электрохимические и электрофизические методы обработки материалов. – 1990. – С. 80-92. 7. *Охрименко Г.М.* Оболочки на основе промышленных стеклоэлементов при внешнем давлении / *Г.М. Охрименко* // Прочность элементов конструкций из стекла и ситалла. – К.: Наук. думка. – 1983. – С. 131-152. 8. Конструкционная прочность стекол и ситаллов / *Г.С. Писаренко* [и др.] – К.: Наук. думка, 1979. – 284 с. 9. *Марков А.И.* Ультразвуковая обработка материалов / *А.И. Марков, А.М. Дальский* // Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.

Bibliography (transliterated): 1. Suslov A.G. Kachestvo poverhnostnogo sloja detalej mashin / A.G. Suslov - M.: Mashinostroenie, 2000. - 320 s. 2. Gusev V.V. Obespechenie jekspluacionnyh harakteristik izdelij iz konstrukcionnoj keramiki na stadii ih proizvodstva / V.V. Gusev, L.P. Kalafatova // Suchasni tehnologii u mashinobuduvanni. / [zag. red. A.I. Grabchenko] – Harkiv: NTU «HPI», T2. - 2006. – S. 334-346. 3. Kalafatova L.P. Osoblivosti mehanichnoi obrobki virobiv iz krihkih nemetalevih materialiv / L.P. Kalafatova // Procesi mehanichnoi obrobki v mashinobuduvanni. Zb. nauk. prac'. – Zhitomir: ZhDTU, 2007. – Vip.. 5: k 2-h ch. – Ch. 1. – S. 72-87. 4. Kalafatova L.P. Osoblivosti mehanichnoi obrobki virobiv iz krihkih nemetalevih materialiv / L.P. Kalafatova. // Procesi mehanichnoi obrobki v mashinobuduvanni - 2007. – Vip.. 5: v 2-h ch. – Ch. 1. – S. 72-87. 5. Ardamackij A.L. Almaznaja obrabotka opticheskikh detalej. / A.L. Ardamackij – L.: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1978. – 232 s. 6. Chmir M.Ja. Vzaimosvjaz' tehnologicheskikh pokazatelej almazno-jelektrohimicheskogo shlifovanija, harakteristik oborudovanija i uslovij obrabotki / M.Ja. Chmir, N.A. Troickij // Jelektrohimicheskie i jelektrofizicheskie metody obrabotka materialov. - 1990. - S. 80-92. 7. Ohrimenko G.M. Obolochki na osnove promyshlennyh steklojelementov pri vneshnem davlenii / G.M. Ohrimenko // Prochnost' jelementov konstrukcij iz stekla i sitalla. - K.: Nauk. dumka. - 1983. - S. 131-152. 8. Konstrukcionnaja prochnost' stekol i sitallov / G.S. Pisarenko [i dr.].- K.: Nauk. dumka, 1979. - 284 s. 9. Markov A.I. Ul'trazvukovaja obrabotka materialov / A.I. Markov, A.M. Dal'skij // Biblioteka tehnologa. – M.: Mashinostroenie, 1980. – 237 s.

УДК 621.941

В.М. КОБЕЛЕВ, канд. техн. наук, **И.М. ТВОРИЩУК**,
АНД. А. ОРГИЯН, Одесса, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ И ЖЕСТКОСТИ СТАНКА ПРИ СОВМЕЩЕНИИ ПОДРЕЗКИ С РАСТАЧИВАНИЕМ

У статті вивчено вібростійкість процесу тонкого розточування, поєднаного з підрізуванням торців. Розроблена розрахункова модель, що описує вигинисті коливання інструменту й осьові коливання пристосування з заготовкою, а також процес різання на основі його динамічної характеристики. Отримані відповідні результати розрахунків та експериментів для визначення жорсткості пристосування, необхідної для підрізування торця заданої ширини.

В статье изучена виброустойчивость процесса тонкого растачивания, совмещенного с подрезкой торцов. Разработана расчетная модель, описывающая изгибные колебания инструмента и осевые колебания приспособления с заготовкой, а также процесс резания на основе его динамической характеристики. Получены соответствующие результаты расчетов и экспериментов для определения жесткости приспособления, необходимой для подрезки торца заданной ширины.

The article explored the vibration process of fine boring combined with trimming ends. The design model is developed that describes the bending vibrations of the instrument and the axial oscillation device with the workpiece as well as cutting process based on its dynamic characteristics. Received the appropriate calculations and experiments to determine the stringency of device needed to trim the width specified Endcap.

На специальных отделочно-расточных станках (ОРС), кроме операции тонкого растачивания выполняется целый ряд других операций: наружное точение, подрезание торцов, фрезерование и др. Высокое качество обрабатываемых поверхностей является основным требованием выполнения этих операций.

Метод радиальной подачи резца часто используется при тонкой подрезке торцов. Такой метод обеспечивает получение точного торца с

высокой чистотой поверхности, хотя производительность такого метода обработки сравнительно невысока. Достаточно сложной представляется также задача разработки и изготовления резцовой головки, которая может обеспечить радиальную подачу резца: наличие механизма радиальной подачи затрудняет изготовление компактной и хорошо сбалансированной головки.

Метод осевой подачи с использованием широколезвийного резца-ножа является более простым и производительным [1]. Исследования по определению условий виброустойчивости при подрезке свободных торцов широколезвийным резцом были основаны на представлении эквивалентной упругой системы моделью с одной степенью свободы, соответствующей колебаниям приспособления в направлении подачи [2].

В практике проектирования ОРС часто встречаются детали, когда подрезаемый торец не свободен и операция подрезки совмещается с операцией растачивания. Обе названные операции выполняются одним и тем же резцом, при этом вершинная часть растачивает боковую цилиндрическую поверхность отверстия, а главная режущая кромка резца, выполненного в виде прямоугольного широкого ножа, обрабатывает внутренний торец (рис. 1). Следует отметить, что динамика процесса тонкого растачивания изучена достаточно подробно, и виброустойчивость ТС при обработке одной лишь боковой поверхности рассчитывается известными методами.

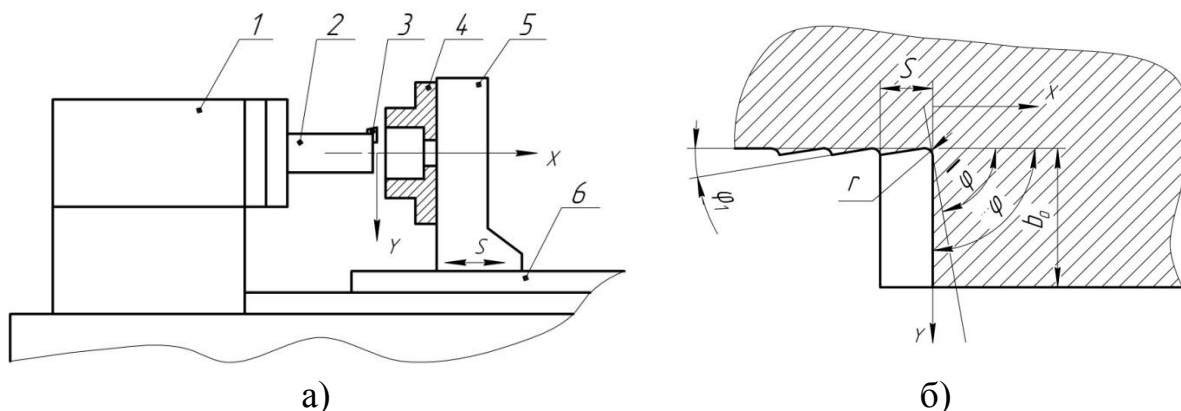


Рисунок 1 – Схема эксперимента (а) и углы резца в зоне резания (б):

1-шпиндельная головка, 2-борштанга, 3-резец, 4-образец,
5-стойка, 6-стол станка

Совмещение операций растачивания и подрезки торца приводит к необходимости учета связанных колебаний в двух направлениях: радиальном (ось y) и осевом (ось x) (рис. 1) Параметры подсистем, описывающие колебания по этим направлениям, определяются приведенными к зоне резания жесткостями (C_y и C_x), массами (m_y и m_x) и характеристиками затухания (b_y и b_x) при колебаниях на основных частотах (f_y и f_x). Предполагается, что связь между колебаниями борштанги и приспособления осуществляется лишь через процесс резания. Для описания процесса резания принимаем динамическую характеристику, полученную В.А. Кудиновым [2]. Характеристика отражает отставание изменений силы резания P_z от изменений толщины среза a и записывается в виде дифференциального уравнения

$$T_p \dot{P}_z + P_z = -k_p a, \quad (1)$$

где T_p - постоянная времени стружкообразования,

$T_p = 1,5 \frac{a_o \xi}{V}$, выражаемая через толщину среза a_o , продольную усадку стружки ξ и скорость резания V ;

$k_p = 1,5 \sigma_b \xi b_o$ - коэффициент резания, выражаемый через временное сопротивление σ_b , усадку ξ и ширину среза b_o .

Изменение толщины среза a происходит при колебаниях в зоне резания по осям Y и X и может быть представлено в виде суммы частных перемещений, измеряемых в направлении схода стружки, нормальном к стороне угла $\bar{\varphi}$ - эффективного угла в плане. При резании свободного торца углы φ и $\bar{\varphi}$ равны. При несвободном резании угол φ больше, чем $\bar{\varphi}$. Изменение толщины среза

$$a = y \cos \bar{\varphi} + x \sin \bar{\varphi}. \quad (2)$$

Уравнения движения для двух подсистем: шпиндель – борштанга и деталь – приспособление имеют вид

$$\begin{aligned} m_y \ddot{y} + b_y \dot{y} + C_y y &= P_y \\ m_x \ddot{x} + b_x \dot{x} + C_x x &= P_x. \end{aligned} \quad (3)$$

При малых углах γ можно считать, что

$$\begin{aligned}P_{xy} &= \mu P_z \\P_x &= P_{xy} \sin \bar{\varphi} \\P_y &= P_{xy} \cos \bar{\varphi}.\end{aligned}$$

Подставляя эти выражения в уравнения (3), а (2) в динамическую характеристику (1), получаем уравнения движения замкнутой системы

$$\begin{aligned}m_y \ddot{y} + b_y \dot{y} + C_y y &= P_z \mu \cos \bar{\varphi} \\m_x \ddot{x} + b_x \dot{x} + C_x x &= P_z \mu \sin \bar{\varphi} \\T_p \dot{P}_z + P_z &= -k_p (y \cos \bar{\varphi} + x \sin \bar{\varphi}).\end{aligned}\tag{4}$$

Основной особенностью рассматриваемого процесса является малое отличие угла $\bar{\varphi}$ от $\frac{\pi}{2}$. Обозначим малый угол $\frac{\pi}{2} - \bar{\varphi} = \psi$. Тогда выражения для функций от аргумента $\bar{\varphi}$ принимают вид:

$$\begin{aligned}\sin \bar{\varphi} &\approx 1 - \frac{\psi^2}{2} \\ \cos \bar{\varphi} &\approx \psi.\end{aligned}$$

Отсюда следует, что уравнения движения (4) могут быть представлены в форме

$$\begin{aligned}m_y \ddot{y} + b_y \dot{y} + C_y y &= P_z \mu \psi \\m_x \ddot{x} + b_x \dot{x} + C_x x &= P_z \mu (1 - \frac{\psi^2}{2}) \\T_p \dot{P}_z + P_z &= -k_p [y \psi + x (1 - \frac{\psi^2}{2})].\end{aligned}\tag{5}$$

Составим характеристическое уравнение для системы (5), пренебрегая слагаемыми с ψ^4

$$\begin{aligned}(m_y p^2 + b_y p + C_y)(m_x p^2 + b_x p + C_x)(T_p p + 1) + \\ + \mu k_p \psi^2 (m_x p^2 + b_x p + C_x) + \mu k_p (1 - \psi^2)(m_y p^2 + b_y p + C_y) = 0.\end{aligned}$$

Так как все коэффициенты этого уравнения положительны, устойчивость замкнутой динамической системы определяется двумя условиями:

$$\begin{aligned}\Delta_2 &= (a_1 a_2 - a_0 a_3) > 0 \\ \Delta_4 &= \Delta_2 (a_3 a_4 - a_2 a_5) - (a_1 a_4 - a_0 a_5)^2 > 0,\end{aligned}$$

где:

$$a_0 = m_y m_x T_p$$

$$a_1 = m_y m_x + T_p (m_y b_x + m_x b_y)$$

$$a_2 = T_p (m_y C_x + m_x C_y + b_x b_y) + m_y b_x + m_x b_y$$

$$a_3 = T_p (b_y C_x + b_x C_y) + m_y C_x + m_x C_y + b_y b_x + \mu k_p \psi^2 m_x + \mu k_p (1 - \psi^2) m_y$$

$$a_4 = T_p C_y C_x + (b_y C_x + b_x C_y) + \mu k_p \psi^2 b_x + \mu k_p (1 - \psi^2) b_y$$

$$a_5 = C_y C_x + \mu k_p \psi^2 C_x + \mu k_p (1 - \psi^2) C_y$$

Для расчета Δ_2 и Δ_4 составлена программа реализуемая в среде MatLab.

Расчетная схема замкнутой динамической системы при совмещении операций подрезки и растачивания, описанная выше, отражает основную особенность системы – малое отличие угла $\bar{\varphi}$ от $\frac{\pi}{2}$. Поэтому отношение P_x/P_z оказывается большим и колебания в системе развиваются, в основном по форме изгиба приспособления.

Основной задачей эксперимента является определение характеристик жесткости и колебаний системы в направлении X . Для выполнения расчетной проверки условий устойчивости системы были определены также и параметры подсистемы шпиндель-борштанга, деформации которой вызывают перемещения в направлении Y .

С целью определения суммарной технологической жесткости в направлении подачи и выявления роли приспособления в общем балансе жесткости измерялись: 1) относительные перемещения фланца шпинделя и приспособления на высоте 340 мм от зеркала стола (рис. 2а) и 2) перемещения приспособления относительно стола на высотах 180 мм и 340 мм от зеркала стола (рис. 2б). Нагружение осуществлялось с помощью домкрата через динамометр сжатия в распор между фланцем и приспособлением.

Усилие увеличивалось ступенчато от 50 кг до 150 кг. Перемещения измерялись микрокатором с ценой деления 0,2 мкм. Микрокатор крепился на жесткой базе.

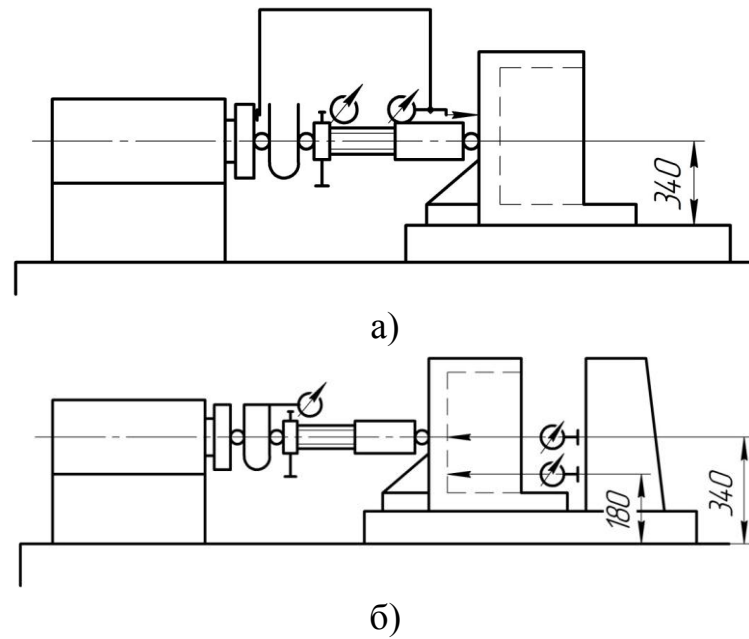


Рисунок 2 – Измерение статической жесткости а) фланца шпинделя и приспособления и б) приспособления относительно стола

Выполнены расчеты виброустойчивости при изменении податливости приспособления при подрезке торцов заготовок из стали и чугуна. Определены рациональные значения податливостей приспособлений для получения оптимальных значений ширины торца при устойчивом резании. Некоторые результаты экспериментов и расчетов представлены на рис. 3.

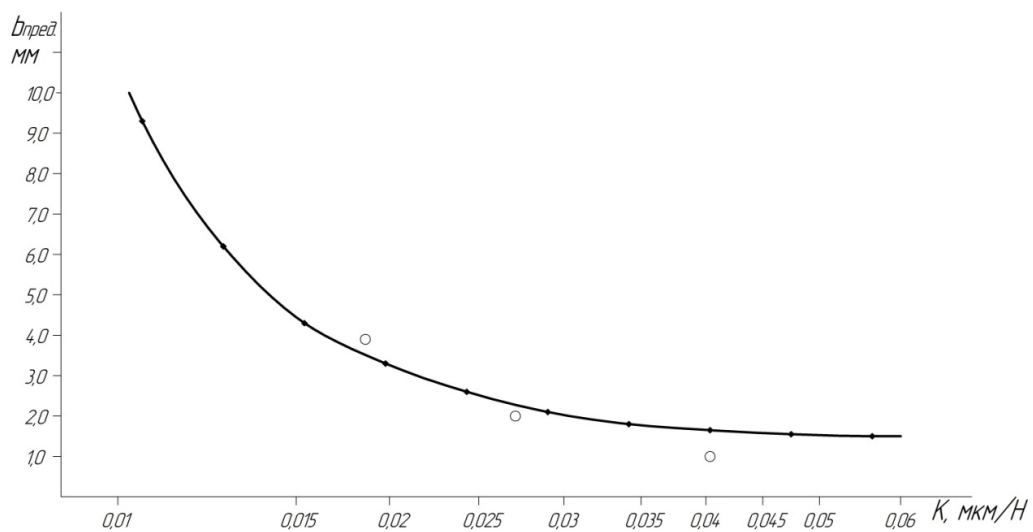


Рисунок 3 – Зависимость предельной ширины среза от податливости приспособления: ●-расчет; ○-эксперимент

Выводы

1. Получены величины минимально допустимых жесткостей приспособления при обработке деталей из стали и чугуна в зависимости от ширины свободного торца. Например, приспособление с осевой жесткостью 120 Н/мм оказывается пригодным для торца не более 6мм без выхаживания и до 2 мм с выхаживанием.
2. Подрезку торцов следует проводить на специальных приспособлениях с жесткостью не меньше 200 Н/мм.
3. В случае, когда операция подрезки включает длительное выхаживание, минимально допустимую жесткость необходимо увеличить в 2 раза.

Список использованных источников: 1.Вергилие И.С., Гольдраих Г.М. Подрезка широких торцов на алмазно-расточных станках. – Технология и организация производства, 1967, N3, с.25-28. 2. Кудинов В.А. Динамика станков. М., «Машиностроение», 1967, 359с.

Bibliography (transliterated): 1.Vergilie I.S., Gol'draih G.M. Podrezka shirokih torcov na almazno-rastochnyh stankah. – Tehnologija i organizacija proizvodstva, 1967, N3, s.25-28. 2. Kudinov V.A. Dinamika stankov. M., «Mashinostroenie», 1967, 359s.

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 ПРОЦЕССА ПРАВКИ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Наведено результати досліджень з 3D моделювання напружено-деформованого стану в зоні правки алмазних шліфувальних кругів алмазними олівцями. Встановлено вплив основних факторів на виникаючі внутрішні напруження в зернах. Запропоновано удосконалену технологію виготовлення алмазних олівців.

Приведены результаты исследований по 3D моделированию напряженно-деформированного состояния в зоне правки алмазных шлифовальных кругов алмазными карандашами. Установлено влияние основных факторов на возникающие внутренние напряжения в зернах. Предложена усовершенствованная технология изготовления алмазных карандашей.

The results of studies on the 3D simulation of deflected mode in the area of dressing of diamond grinding wheels with diamond dressers are presented. The influence of the main factors in the internal stresses arising in the grains is established. An improved technology for producing diamond dressers are proposed.

Постановка проблемы. Известно, что правку алмазных кругов выполняют в случаях «засаливания» режущей поверхности, при неравномерном износе и необходимости восстановления заданной формы круга. Наиболее простым и доступным способом является правка алмазными карандашами методом обтачивания. При правке алмазным инструментом может происходить дробление абразивного материала, удаление целых зерен и связки шлифовального круга. В связи с этим представляет определенный интерес установление физической сущности процесса разрушения зерен круга. На наш взгляд одним из путей решения этой задачи является использование 3D моделирования методом конечных элементов. В перспективе это позволит установить условия управления

характером этого разрушения в пределах от микро- до макроразрушения.

Анализ последних исследований и публикаций. 3D моделирования методом конечных элементов уже широко используется применительно к процессам лезвийной [1], абразивной [2] обработок, а также спекания алмазосодержащего слоя кругов на различных связках [3] и правки шлифовальных кругов из традиционных абразивных материалов [4]. Данные по анализу напряженно-деформированного состояния (НДС) при правке алмазных кругов алмазными карандашами отсутствуют, в то время как этот процесс имеет ряд принципиальных особенностей, которые связаны, в первую очередь, с использованием алмазных зерен и наличием в них включений металлофазы физико-механическими свойствами которой существенно отличаются от алмаза.

Цель исследования. Выявление физических особенностей процесса правки алмазных кругов алмазными карандашами.

Основные материалы исследования. Расчеты по методу конечных элементов позволяют количественно оценить главные и приведенные напряжения, энергию деформации и плотность энергии деформации в системе «правлящий элемент – алмазные зерна – связка круга» в зависимости от их размеров, физико-механических свойств и условий правки (например, глубина правки, марка связки (припоя) карандаша, скорость осуществления процесса и др.).

Исследование НДС в алмазных зернах при правке алмазных кругов. В данной работе проводилась серия расчетов для фрагмента алмазосодержащего слоя, включающего несколько зерен, окруженных массивом связки. В качестве связующего материала рассматривались металлические, органические и керамические связки. В качестве моделей алмазных зерен использовался многогранник в поперечном сечении, которого лежит восьмиугольник. Наличие металла-катализатора в алмазных зернах моделировалось произвольно ориентированными пластинами, объемное содержание которых составляло 5% или 10% [5]. Для исследования влияния количества металлофазы на процесс правки рассматривалось наличие в зерне одного, двух и трех включений металлофазы, расположенных на периферии зерна. Вначале, была построена исходная 3D-модель системы «правлящий элемент – алмазные зерна – связка круга»

(рис. 1). Полагалось, что модели являются сплошными упругими телами. Все геометрические модели построены с использованием коммерческого программного CAD обеспечения SolidWorks.

Схема нагружения модели приведена на рис. 2.

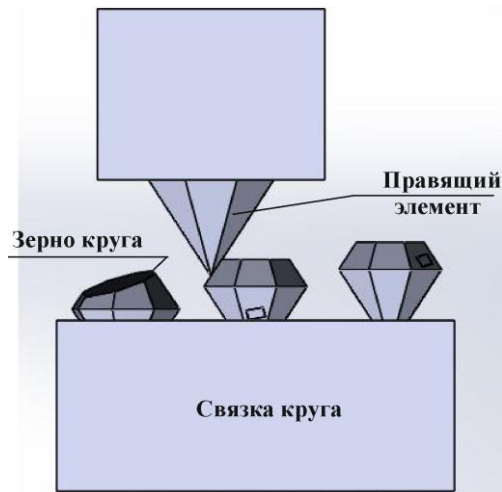


Рисунок 1 – 3D-модель системы «правлящий элемент – алмазные зерна – связка круга»

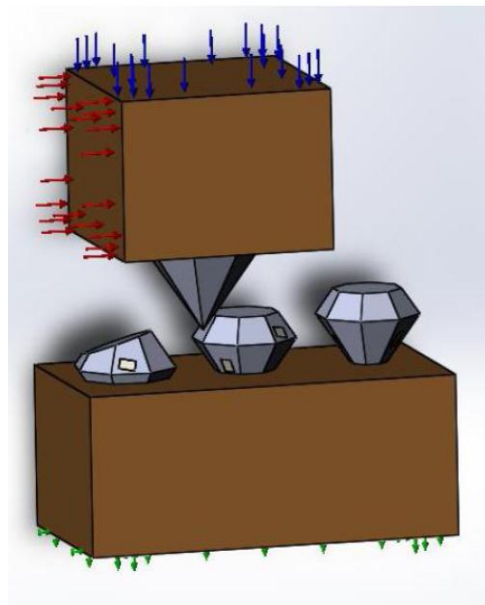
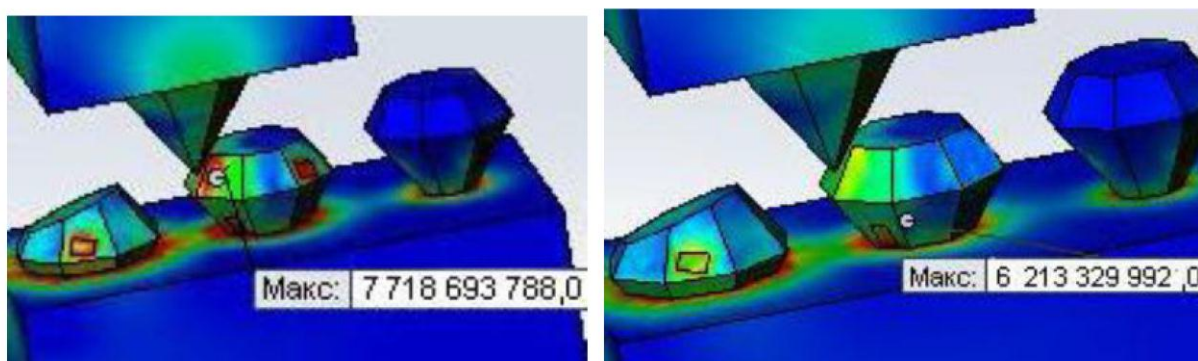


Рисунок 2 – Схема нагружения модели процесса правки круга

Исследование влияния металлофазы на НДС показало увеличение напряжений в зернах в местах ее сосредоточения. С увеличением

количества металлических включений в зернах их прочность и термостойкости снижаются.

Концентрация максимальных напряжений в области металлофазы свидетельствует о том, что именно она может играть ключевую роль в разрушении алмазных зерен в процессе правки алмазно-абразивного инструмента. И чем больше включений металлофазы присутствуют в одном зерне (рис. 3), тем более интенсивно будет происходить их разрушение.



а)

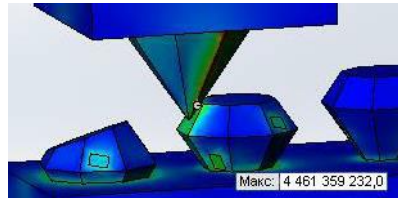
б)

Рисунок 3 – Влияние количественного содержания металлофазы в зерне на изменение в нем эквивалентных напряжений

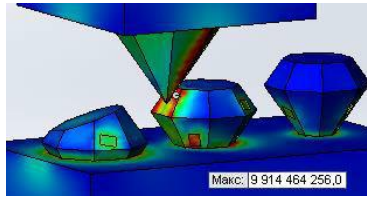
На рис. 4 представлены результаты расчета НДС для различных значений давления в контакте и типов связок. Значения давления принимались соответственно 10 МПа, 55 МПа, 100 МПа применительно к керамической (а), органической (б) и металлической (в) связкам. Материал металлофазы – никель, количество включений металлофазы - три. Наименьшие напряжения наблюдаются при правке кругов на керамической связке с давлением 10 МПа. Наибольшие напряжения наблюдаются при правке кругов на металлической связке, с давлением 100 МПа.

Повышение эффективности процесса правки за счет совершенствования правящего алмазного карандаша. Суть изменения технологии изготовления алмазных карандашей [6, 7] состоит, во-первых, в использовании синтетических поликристаллических алмазов (СПА), полученных CVD методом [8]. Физико-механические свойства этого

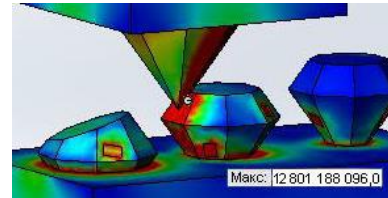
алмаза приближаются к свойствам природного алмаза. Во-вторых, на эти поликристаллы предварительно наносится толстослойное рельефное металлическое покрытие [9].



$P=10 \text{ МПа}, \sigma_{\text{ЭКВ.}}=5,72 \text{ ГПа}$

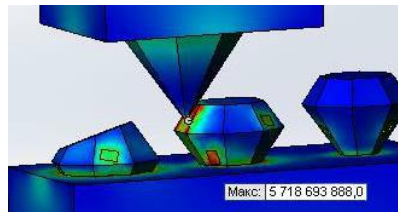


$P=55 \text{ МПа}, \sigma_{\text{ЭКВ.}}=9,91 \text{ ГПа}$

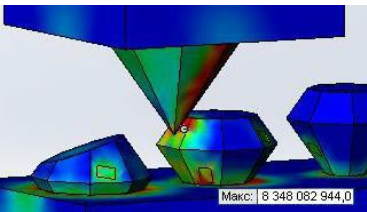


$P=100 \text{ МПа}, \sigma_{\text{ЭКВ.}}=12,8 \text{ ГПа}$

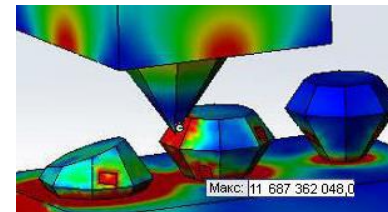
а)



$P=10 \text{ МПа}, \sigma_{\text{ЭКВ.}}=4,46 \text{ ГПа}$

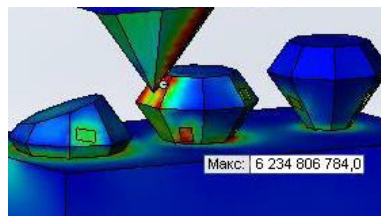


$P=55 \text{ МПа}, \sigma_{\text{ЭКВ.}}=8,35 \text{ ГПа}$

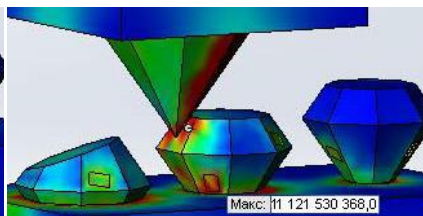


$P=100 \text{ МПа}, \sigma_{\text{ЭКВ.}}=11,7 \text{ ГПа}$

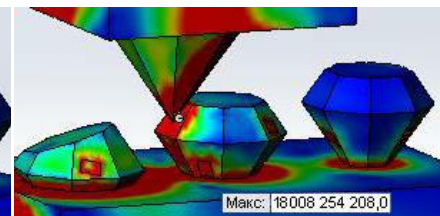
б)



$P=10 \text{ МПа}, \sigma_{\text{ЭКВ.}}=6,23 \text{ ГПа}$



$P=55 \text{ МПа}, \sigma_{\text{ЭКВ.}}=11,21 \text{ ГПа}$



$P=100 \text{ МПа}, \sigma_{\text{ЭКВ.}}=18,0 \text{ ГПа}$

в)

Рисунок 4 - Визуализация результатов моделирования процесса правки алмазоносного слоя круга

Роль покрытия при изготовлении алмазного карандаша многоцелевая. С одной стороны оно способствует увеличению силы удержания СПА в державке карандаша как за счет лучшего сцепления алмаза с покрытием в сравнении со связкой (припоем), так и за счет увеличения общей площади поверхности покрытого СПА. Во вторых в условиях воздействия на СПА высоких значений сил и температур (при их

закреплении в державке карандаша) оно предотвращает возможное растрескивание и разрушение поликристалла алмаза [10]. Для карандашей типа 01 (ГОСТ 607-80), в которых алмазные поликристаллы расположены цепочкой, их предложено предварительно соединять, например, склеиванием цепочкой в блок, после чего наносить на этот блок рельефное толстослойное металлическое покрытие. И уже после этого указанный блок поликристаллов закреплять в державке карандаша одним из известных способов, например, запайкой. Конструкция карандаша схематически представлена на рис. 5. Такой подход позволяет еще на предварительном этапе обеспечить точное и плотное прилегание поликристаллов друг к другу, что важно для осуществления процесса непрерывной правки, а также более полное использование ресурса алмаза. Предварительные исследования показали, что минимальная толщина покрытия должна быть не менее чем 0,1 мм.

Реализация описанных технических решений, предложенных на основе исследований, сводит к минимуму необходимость в выходном контроле готовых алмазных правящих карандашей, способствует повышению их качества, а, следовательно, и их общего срока службы при последующей эксплуатации.

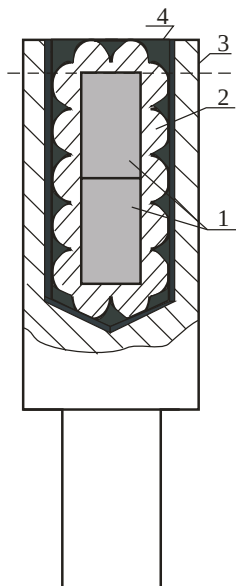


Рисунок 5 – Алмазный карандаш

1 – СПА; 2 – покрытие; 3 – державка; 4 – припой (связка)

На кафедре «Интегрированные технологии машиностроения» НТУ «ХПИ» были проведены испытания алмазных карандашей производства ПАО «Полтавский алмазный инструмент» (шифр 800053 А-01).

Испытания проводились на модернизированном круглошлифовальном станке мод. 3У12 согласно требованиям ГОСТ 607-80 на следующих режимах: скорость шлифовального круга $V_k=35\text{ м/с}$; скорость продольной подачи $S_{пр.}=0,5\text{ м/мин}$; поперечная подача $S_{поп.}=0,03\text{ мм/ход}$, производительность подачи эмульсии в зону правки 20 л/мин. Испытуемый абразивный круг имел следующую характеристику ПП 250х40х76 24А 25 СТ 1 К (вариант 1). Для сравнения испытания были проведены на кругах ПП 250х40х76 24А 25 М 1 К (вариант 2) и ПП 250х40х76 24А 8 М 1 К (вариант 3, $S_{поп.}=0,01\text{ мм/ход}$). В качестве критерия оценки использовалась удельная производительность $Q\text{ (см}^3\text{/мГ.)}$. В качестве базового использовали карандаш 3908-0051 (исполнение А, тип 01) из природного алмаза производства ОАО «Терекалмаз» (весовая группа алмазов 0,03 - 0,05 карат, общая масса алмазов, 0,5 карат). Результаты испытаний представлены в таблице.

Таблица – Результаты испытаний алмазных карандашей.

№ варианта	800053 А-01	3908-0051	Расхождение, %
1	$Q=49\text{ см}^3\text{/мГ}$	$Q=51\text{ см}^3\text{/мГ}$	4
2	$Q=1984\text{ см}^3\text{/мГ}$	$Q=1990\text{ см}^3\text{/мГ}$	0,3
3	$Q=5000\text{ см}^3\text{/мГ}$	$Q=5000\text{ см}^3\text{/мГ}$	0

Выводы и перспективы развития. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о следующем: 1 - наличие в алмазных зернах металлофазы при силовом нагружении исследуемой системы для различных видов связей может способствовать облегчению процесса их разрушения при правке кругов. 2 – усовершенствованные алмазные карандаши обеспечивают работоспособность при правке абразивных кругов на уровне природных алмазов.

В дальнейшем представляет интерес исследования по правке алмазных кругов предложенными алмазными карандашами.

Список использованных источников: 1. Heisel U, Krivoruchko DV, Zaloha VA, Storchak M (2007) CauseAnalysis of Errors in FE Prediction Orthogonal Cutting Performances. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. Calabria 141–148. 2. Федорович В.О. Розробка наукових основ та способів практичної реалізації управління пристосовуваністю при алмазному шліфуванні надтвердих матеріалів. Автореф. дис.... докт. техн. наук 05.03.01 – Харків, 2002, 34с. 3. Козакова Н.В. Определение рациональных характеристик алмазных кругов путем 3D моделирования процессов их изготовления и шлифования сверхтвердых материалов: дис... канд. техн. наук: 05.03.01 / Козакова Наталья Витальевна. - Харьков, 2004. - 210 с. 4. Шахбазов Я.О. Наукові і технологічні основи формування різального рельєфу шліфувальних кругів з метою підвищення ефективності обробки: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Шахбазов Яків Олександрович. – Львів: - 2006. – 318с. 5. Грабченко А.И. 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования / Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Федорович В.А. Учебн. пособие. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006.-364 с. 6. Грабченко А.И., Пыжов И.Н., Клименко В.Г. Повышение работоспособности правящих алмазных карандашей /Збірник наукових праць (Галузеве машинобудування, будівництво) // Полтав. нац. техн. ун-т ім. Ю. Кондратюка. – Полтава: ПолтНТУ, 2011. – Вип.5(35).-С. 7. Пат. 74681 Україна, МПК (2012.01) B24 В 53/00. Спосіб виготовлення алмазного олівця / Грабченко А.І., Пижов І.М., Федорович В.О., Клименко В.Г. Власник Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кодратюка - № и 2012 04084; заявл. 03.04.2012; опубл. 12.11.2012. Бюл. № 21. 8. Электронный ресурс. [CVD-Diamant als Schneidstoff](http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2003_4/10_art/Art10_04_03.htm). [http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2003_4/10_art/Art10_04_03](http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2003_4/10_art/Art10_04_03.htm). htm. 9. Методы определения показателей качества никелевого покрытия / [Гринь Г.И., Козуб П.А., Мухина Л.В., Дробонюг И.Н.] // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПИ». – 2006. – № 12. – С. 90-94. 10. Влияние металлизации на окисление синтетических поликристаллических материалов. / [Кудрявцев К.К., Страхова Г.М., Панченко М.А.] // –Сб. «Алмазы и сверхтвердые материалы». Вып. 5, 1976. -С. 3-4.

Bibliography (transliterated): 1. Heisel U, Krivoruchko DV, Zaloha VA, Storchak M (2007) CauseAnalysis of Errors in FE Prediction Orthogonal Cutting Performances. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. Calabria 141–148. 2. Fedorovich V.O. Rozrobka naukovih osnov ta sposobiv praktichnoї realizacії upravlinnja pristosovuvaništju pri almaznomu shlifuvanni nadtverdi materialiv. Avtoref. dis.... dokt. tehn. nauk 05.03.01 – Harkiv, 2002, 34s. 3. Kozakova N.V. Opredelenie racional'nyh harakteristik almaznyh krugov putem 3D modelirovanija processov ih izgotovlenija i shlifovanija sverhtverdyh materialov: dis... kand. tehn. nauk: 05.03.01 / Kozakova Natal'ja Vital'evna. - Har'kov, 2004. - 210 s. 4. Shahbazov Ja.O. Naukovi i

tehnologichni osnovi formuvannja ryzal'nogo rel'efu shlifoval'nih krugiv z metodu pidvishhennja efektyvnosti obrobki: dis. ... d-ra tehn. nauk: 05.03.01 / Shahbazov Jakiv Oleksandrovich. – L'viv: - 2006. – 318s. 5. Grabchenko A.I. 3D modelirovaniealmazno-abrazivnyh instrumentov i processov shlifovanija / Grabchenko A.I., Dobroskok V.L., Fedorovich V.A. Uchebn. posobie. – Har'kov: NTU «HPI», 2006.-364 s. 6. Grabchenko A.I., Pyzhov I.N., Klimenko V.G. Povyshenie rabotosposobnosti pravjashhihalmaznyh karandashej /Zbirnik naukovih prac' (Galuzeve mashinobuduvannja, budivnictvo) // Poltav. nac. tehn. un-t im. Ju. Kondratjuka. – Poltava: PoltNTU, 2011. – Vip.5(35).-S. 7. Pat. 74681 Ukraïna, MPK (2012.01) V24 V 53/00. Sposib vigotovlennjaalmaznogo olivcja / Grabchenko A.I., Pizhov I.M., Fedorovich V.O., Klimenko V.G. Vlasnik Poltavs'kij nacional'nij tehničnij universitet im. Ju. Kodratjuka - № u 2012 04084; zajavl. 03.04.2012; opubl. 12.11.2012. Bjul. № 21. 8. Jelektronnyj resurs. CVD-Diamant als Schneidstoff. http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2003_4/10_art/Art10_04_03.htm. 9. Metody opredelenija pokazatelej kachestva nikelovogo pokrytija / [Grin' G.I., Kozub P.A., Muhina L.V., Drobonog I.N.] // Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut». – Harkiv: NTU «HPI». – 2006. – № 12. – S. 90 – 94. 10. Vlijanie metallizacii na okislenie sinteticheskikh polikristallicheskich materialov. / [Kudrjavcev K.K., Strahova G.M., Panchenko M.A.] // –Sb. «Almazny i sverhtverdye materialy». Vyp.5, 1976. -S. 3-4.

УДК621.9.06.-229.331

В.М. ТОНКОНОГИЙ, д-р техн. наук,
А.А ЯКИМОВ, д-р техн. наук, Одесса, Україна

РАСЧЕТ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ПРЕРЫВИСТОМ ШЛИФОВАНИИ

Виявлено шляхи зниження амплітуди коливань, що виникають при шліфуванні переривчастими кругами, за рахунок зменшення величини відношення часу роботи ріжучого виступу до періоду власних коливань пружної системи шліфувального верстата. Виявлені закономірності зниження температури і тангенціальної складової сили різання при збільшенні кількості западин на робочій поверхні переривчастого абразивного інструменту. Обґрунтовано доцільність заміни переривчастих кругів з великим числом прорізів на робочій поверхні на високопористі круги.

Выявлены пути снижения амплитуды колебаний, возникающих при шлифовании прерывистыми кругами, за счет уменьшения величины отношения времени работы режущего выступа к периоду собственных колебаний упругой системы шлифовального станка. Выявлены закономерности снижения температуры и тангенциальной составляющей силы резания при увеличении количества впадин на рабочей поверхности прерывистого абразивного инструмента. Обоснована целесообразность замены прерывистых кругов с большим числом прорезей на рабочей поверхности на высокопористые круги.

Identified ways to reduce the amplitude of oscillations induced by intermittent grinding circles, by reducing the ratio of operating time of the cutting lip to the period of natural oscillations of elastic system of the grinding machine. The regularities of the reduction temperature and the tangential component of the cutting force when the number of depressions on the working surface of an abrasive tool discontinuous. The expediency of replacing the broken circle with a large number of slots on the working surface in the highly porous wheels.

Постановка проблеми. Колебания, которые обусловлены прерываемостью процесса шлифования, изменяют условия динамического взаимодействия инструмента и детали. Изменение условий

взаимодействия абразивного прерывистого круга и заготовки может оказывать как позитивное, так и негативное влияние на формирование качества поверхностного слоя обрабатываемой детали. Для оценки этого влияния необходимо знать величину амплитуды колебаний.

Основной материал исследований. Для уточненного расчета амплитуды колебаний при прерывистом резании воспользуемся аналитическим решением, приведенным в работе [1]. Расчетная схема периодического воздействия импульсов на упругую систему показана на рис. 1.

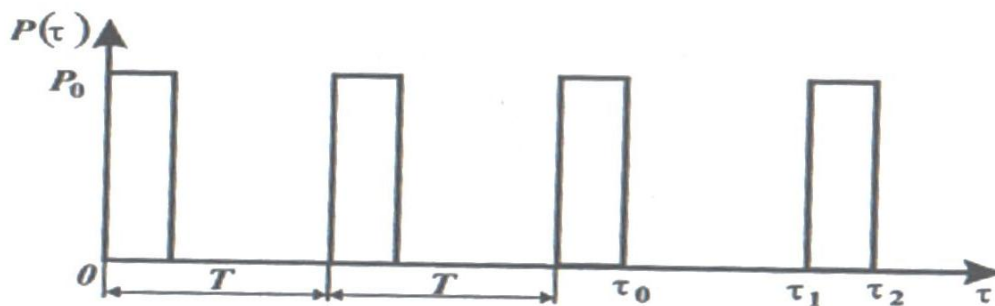


Рисунок 1 – Изменение периодической силы $P(\tau)$

Перемещение и скорость приведенной массы m в начальный момент времени равны y и $\dot{y}_0$. До приложения следующего импульса система будет колебаться с собственной частотой k . Колебания системы описываются уравнением

$$y = y_0 \cdot \cos k\tau + \frac{\dot{y}_0}{k} \cdot \sin k\tau. \quad (1)$$

Скорость перемещения

$$\dot{y} = -k \cdot y_0 \cdot \sin k\tau + \dot{y}_0 \cdot \cos k\tau. \quad (2)$$

В конце этого интервала, непосредственно перед следующим импульсом (по времени τ_1), получим

$$y_1 = y_0 \cdot \cos kT + \frac{\dot{y}_0}{k} \cdot \sin kT, \quad (3)$$

$$\dot{y}_1 = -k \cdot y_0 \cdot \sin kT + \dot{y}_0 \cdot \cos kT. \quad (4)$$

В результате действия очередного импульса скорость мгновенно изменится на величину S/m (где S – значение импульса).

После второго импульса величина перемещения приведенных масс и скорости их движения определяется в виде следующих выражений:

$$y_2 = y_1 = y_0 \cdot \cos kT + \frac{\dot{y}_0}{k} \cdot \sin kT, \quad (5)$$

$$\dot{y}_2 = \dot{y}_1 + \frac{S}{m} = -k \cdot y_0 \cdot \sin kT + \dot{y}_0 \cdot \cos kT + \frac{S}{m}. \quad (6)$$

Импульсы вызывают переодические движения упругой системы с постоянным периодом. Поэтому величины y_2 и $\dot{y}_2$ будут соответственно равны y_0 и $\dot{y}_0$

$$y_2 = y_0 = y_0 \cdot \cos kT + \frac{\dot{y}_0}{k} \cdot \sin kT, \quad (7)$$

$$\dot{y}_2 = \dot{y}_0 = -k \cdot y_0 \cdot \sin kT + \dot{y}_0 \cdot \cos kT + \frac{S}{m}. \quad (8)$$

Система уравнений содержит две неизвестные величины: y_0 и $\dot{y}_0$. Решая систему уравнений, находим

$$y_0 = \frac{S}{2 \cdot m \cdot k} \cdot \operatorname{ctg} \frac{kT}{2}, \quad (9)$$

$$\dot{y}_0 = \frac{S}{2 \cdot m}. \quad (10)$$

С учетом $T = 2\pi/\omega$ (где ω – частота возмущающей силы) закон движения (1) примет вид

$$y = \frac{S \cdot \left[\sin k\tau + \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi \cdot k}{\omega} \right) \cdot \cos k\tau \right]}{2 \cdot m \cdot k}. \quad (11)$$

Амплитуда колебаний определится

$$A = \frac{S \cdot \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \left(\frac{\pi \cdot k}{\omega} \right)}}{2 \cdot m \cdot k} = \frac{S}{\left[2 \cdot m \cdot k \cdot \left| \sin \left(\frac{\pi \cdot k}{\omega} \right) \right| \right]} \quad (12)$$

Дробь $S/(m \cdot k)$ – есть максимальное отклонение режущей кромки инструмента, вызванное однократным импульсом. Выражение

$$\beta = \frac{1}{2 \cdot \left| \sin \frac{\pi \cdot k}{\omega} \right|} \quad (13)$$

служит коэффициентом, отражающим влияние повторяемости импульсов.

На рис. 2 показано изменение коэффициента β в зависимости от отношения частот ω/k .

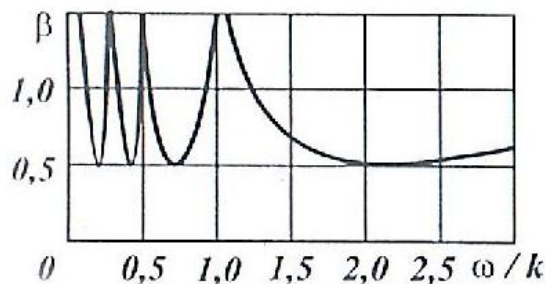


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента β от отношения частот ω/k

При совпадении вынужденной ω и собственной k частот или их кратности ($k = n \cdot \omega$, где $n = 1, 2, \dots$) возникает резонанс. Из зависимости (13) видно, что $\beta_{\min} = 0,5$.

Минимальное значение амплитуды колебаний $A_{\min}$ при $\left| \sin \frac{\pi \cdot k}{\omega} \right|$ с учетом $S = P_0 \cdot \tau$ (где P_0 – значение силы; τ – время действия силы) и

$k = \sqrt{c/m}$ (где c – жесткость технологической системы) определяется таким образом:

$$A_{\min} = 0,5 \cdot A_{cm} \cdot \tau \cdot k, \quad (14)$$

где $A_{cm} = P_0 / c$ – перемещение массы m , соответствующее статическому приложению силы P_0 .

С учетом $k = 2\pi/T$ зависимость (14) окончательно примет вид

$$A_{\min} = A_{cm} \cdot \frac{\pi \cdot \tau}{T}, \quad (15)$$

где T – период собственных колебаний.

Значение $A_{\min}$ зависит от соотношения $\pi \cdot \tau / T$. При малой жесткости технологической системы период собственных колебаний системы относительно большой. Следовательно, уменьшая τ ($\pi \cdot \tau / T \ll 1$), можно существенно уменьшить амплитуду колебаний $A_{\min}$. Это эквивалентно повышению динамической жесткости системы. Значит, при кратковременном действии импульсов определенной продолжительности τ можно практически исключить упругие перемещения системы, приблизив фактическую производительность шлифования к номинальной. При этих условиях режущие зерна внедряются в металл на большую глубину. Создаются условия ударно-циклического взаимодействия связи шлифовального круга с металлом обрабатываемой детали, что способствует протеканию процесса самозатачивания и повышению стойкости и режущей способности абразивно-алмазных инструментов.

Процессы абразивной обработки с использованием высокочастотных (ультразвуковых) колебаний получили широкое практическое применение. Возбудить высокочастотные колебания при шлифовании можно путем применения прерывистых кругов.

Длину рабочего выступа прерывистого круга следует выбирать в соответствии с длительностью контакта τ , вытекающего из зависимости (15).

Эксперименты по определению температуры шлифования θ и тангенциальной составляющей силы резания P_z проводились для шлифования зубчатого колеса из стали 12Х2Н4А (твердость

поверхностного слоя зубьев HRC 60) с модулем $m=8$ мм, с радиусом основной окружности $r_o=110$ мм на зубошлифовальном станке МААГ по нулевой схеме на режимах: скорость круга $V_{kp}=30$ м/с, число качаний стола $n'=112$ кач/мин, продольная подача стола $S=3,57 \cdot 10^{-3}$ м/кач, с глубинами резания $t_1=0,10 \cdot 10^{-3}$ м (кривая 1 на рис. 3, 4), $t_2=0,06 \cdot 10^{-3}$ м (кривая 2 на рис. 3, 4).

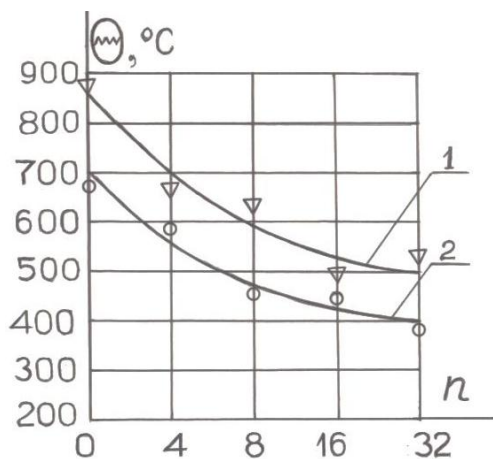


Рисунок 3 – Зависимость температуры шлифования Θ от количества прорезей n на рабочей поверхности абразивного круга

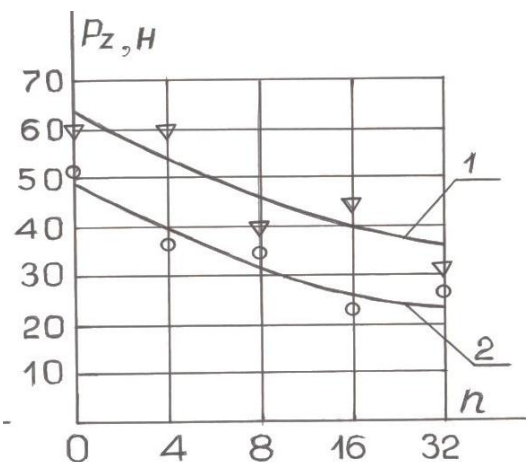


Рисунок 4 – Зависимость тангенциальной составляющей силы резания P_z от количества впадин n на прерывистом круге

Эксперименты проводились сплошным и прерывистыми абразивными тарельчатыми кругами 24A25CM26K (диаметр круга $D_{kp}=220$ мм) с числом впадин на рабочей поверхности $n=4, 8, 16, 32$ и шириной каждой впадины $l_2=10$ мм.

На рис. 3 показана зависимость температуры шлифования от числа впадин, прорезанных на рабочей поверхности абразивного тарельчатого круга (ширина каждой прорези $l_2=10$ мм). Из анализа графиков следует, что температуру поверхности при зубошлифовании прерывистым кругом можно снизить на 42 %. Из графиков видно, что с увеличением

количества прорезей на абразивном инструменте температура уменьшается. Снижение температуры при прерывистом шлифовании связано не только с периодическим прерыванием процесса резания. При работе прерывистым кругом в упругой системе станка возбуждаются высокочастотные колебания. Наличие колебаний изменяет состояние обрабатываемого материала в зоне резания, а именно: материал переходит в хрупкое состояние и тем самым уменьшается работа пластической деформации [2]. Кроме того, высокочастотные колебания способствуют уменьшению сопротивления сходу стружки, так как трение покоя заменяется трением движения [3]. Тангенциальная составляющая P_z силы резания при шлифовании прерывистыми кругами меньше, чем при сплошном шлифовании.

На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости $P_z = f(n)$, построенные для двух режимов шлифования. Из графиков видно, что чем больше прорезей на абразивном круге, тем меньше P_z . Это можно объяснить тем, что прерывистый круг работает в режиме систематического самозатачивания. Снижение сил при прерывистом шлифовании можно также объяснить наличием высокочастотных вынужденных колебаний, облегчающих процесс микрорезания: снижением теплонапряженности процесса шлифования и, как следствие, снижением вероятности адгезионного взаимодействия абразивных зерен с обрабатываемым материалом, а значит замедлением процесса затупления зерен. Кроме того, во впадинах прерывистых кругов хорошо размещается стружка, которая затем выбрасывается из них за счет инерционных сил.

Из работ [4-7] известно, что высокопористые шлифовальные круги способны значительно понизить температуру в зоне резания (до 40%) и сохранять высокую режущую способность во времени по сравнению с обычными кругами. Шлифовальные круги с большим количеством прорезей на рабочей поверхности (80-100) можно с некоторым допущением считать высокопористыми кругами, главное достоинство которых состоит в том, что такие круги легче изготавливать по сравнению с прерывистыми кругами.

Выводы. 1. Установлено, что амплитуда колебаний, возникающих при шлифовании прерывистыми кругами, зависит от величины отношения

времени работы режущего выступа круга τ к периоду собственных колебаний T упругой системы. Уменьшая величину этого отношения, можно существенно уменьшить амплитуду колебаний.

2. Экспериментально установлена закономерность уменьшения температуры и тангенциальной составляющей силы резания при возрастании числа прорезей на прерывистом шлифовальном круге.

3. Выдвинуто и обосновано предположение о целесообразности замены прерывистых кругов высокопористыми абразивными кругами.

Список використаних джерел: 1.Пановко, Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара /Я.Г. Пановко //4-е изд. – Л.: Политехника, 1990. – 272с. 2. Марков, А.И. Ультрозвуковая обработка материалов /А.И. Марков // М.: Машиностроение, 1980. – 237с. 3. Свирицев, В.И. Повышение эффективности процессов шлифования путем управления условиями динамического взаимодействия инструмента с деталью /В.И. Свирицев //Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей технологии в машиностроении. Пермь: Пермский политехн. ин-т, 1983. – С.30-36. 4. Елисеев Ю.С., Солодухин Н.Н., Новиков В.С., Старков В.К., Рябцев С.А., Торопцев М.В. Шлифование зубчатых колес и соединений высокопористыми кругами //Технология машиностроения, 2001. №6. – С. 15-18. 5. Поклад В.А., Новиков В.С., Жуков Ю.И., Старков В.К., Рябцев С.А. Производственные испытания высокопористого эльборового круга при профильном шлифовании зубчатых колес //Технология машиностроения, 2006. №5. – С. 27-31. 6. Старков В.К., Рябцев С.А., I. Fromar, P. Fryc. Высокопористый абразивный инструмент для профильного шлифования зубчатых колес //Research and Development in Me Banja, 2002., Т.1. – С.21-26. 7.Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. М.: «Машиностроение», 2007. – 688 с.

Bibliography (transliterated): 1.Panovko, Ja.G. Osnovy prikladnoj teorii kolebanij i udara /Ja.G. Panovko //4-e izd. – L.: Politehnika, 1990. – 272s. 2. Markov, A.I. Ul'trozvukovaja obrabotka materialov /A.I. Markov //M.: Mashinostroenie, 1980. – 237s. 3. Svirshhev, V.I. Povyshenie jeffektivnosti processov shlifovanija putem upravlenija uslovijami dinamicheskogo vzaimodejstvija instrumenta s detal'ju /V.I. Svirshhev //Sovershenstvovanie processov abrazivno-almaznoj i uprochnjajushhej tehnologii v mashinostroenii. Perm': Permskij politehn. in-t, 1983. – S.30-36. 4. Eliseev Ju.S., Soloduhin N.N., Novikov V.S., Starkov V.K., Rjabcev S.A., Toropcev M.V. Shlifovanie zubchatyh koles i soedinenij vysokoporistymi krugami //Tehnologija mashinostroenija, 2001. №6. – S. 15-18. 5. Poklad V.A., Novikov V.S., Zhukov Ju.I., Starkov V.K., Rjabcev S.A. Proizvodstvennyye ispytaniya vysokoporistogo jel'borovogo kruga pri profil'nom shlifovanii zubchatyh koles //Tehnologija mashinostroenija, 2006. №5. – S. 27-31. 6. Starkov V.K., Rjabcev S.A., I. Fromar, P. Fryc. Vysokoporistyj abrazivnyj instrument dlja profil'nogo shlifovanija zubchatyh koles //Research and Development in Me Banja, 2002., Т.1. – С.21-26. 7.Starkov V.K. Shlifovanie vysokoporistymi krugami. M.: «Mashinostroenie», 2007. – 688 s.

УДК621.9.06.-229.331

А.А ЯКИМОВ д-р техн. наук, Одесса, Україна

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ТЕПЛОВОГО НАСЫЩЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА С ПРЕРЫВИСТОЙ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Встановлений взаємозв'язок між параметрами режиму шліфування, теплофізичними властивостями оброблюваного матеріалу і часом теплового насичення. Зіставлення часу насичення з періодом обертання шліфувального круга дозволяє обґрунтувати технологічні можливості переривчастого шліфування і визначити умови його реалізації.

Установлена взаимосвязь между параметрами режима шлифования, теплофизическими свойствами обрабатываемого материала и временем теплового насыщения. Сопоставление времени насыщения с периодом вращения шлифовального круга позволяет обосновать технологические возможности прерывистого шлифования и определить условия его реализации.

Intercommunication between the parameters of the mode of polishing is set, by thermophysical properties of the processed material and time of thermal satiation. Comparison of time of satiation with the period of rotation of diamond-impregnated allows to ground technological possibilities of the irregular polishing and define the terms of his realization.

Постановка проблемы. При шлифовании деталей в их поверхностных слоях возникают дефекты: прижоги, трещины, растягивающие напряжения.

Прижоги – местные изменения структуры материала, образующиеся в поверхностном слое обрабатываемой детали под действием высоких температур (порядка 450–1200°C). Структурные превращения в поверхностном слое сопровождаются изменением его твердости и появлением в нем остаточных растягивающих напряжений.

Форма шлифовочных прижогов зависит от метода шлифования и

метода наладки станка. При шлифовании зубчатых колес на станке 5833 (Рейсхауэр) прижоги имеют форму светлых пятен (рис. 1), на станках 5851, 5853 (МАОГ) с 15° настройкой кругов возникают циклические темные прижоги (рис. 3), а с нулевой настройкой кругов – штриховые темные прижоги (рис. 2).

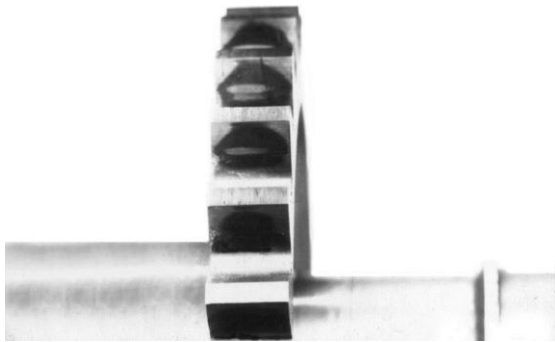


Рисунок 1 – Внешний вид прижога

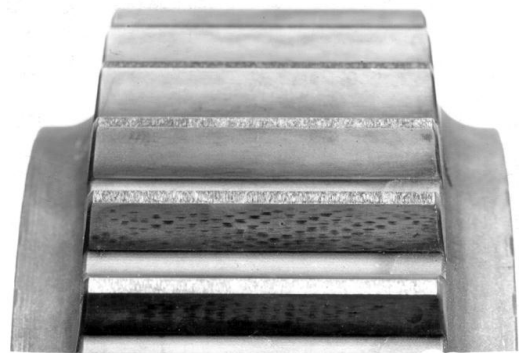


Рисунок 2 – Внешний вид штриховых прижогов

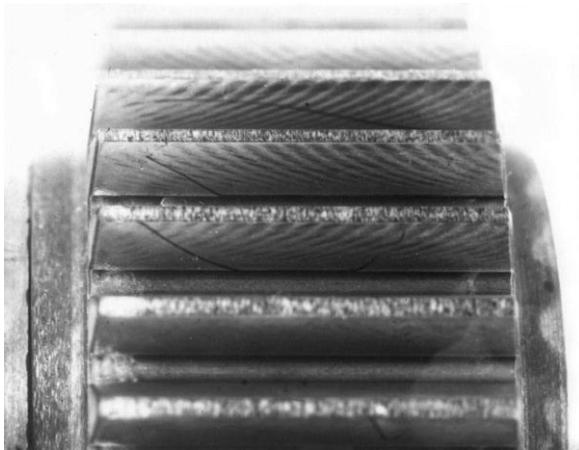


Рисунок 3 – Внешний вид циклического прижога

При шлифовании зубчатых колес конусным кругом на станках 5831 (НАИЛС) прижоги имеют форму чередующихся полос вдоль зуба. Если температура в зоне резания не превышает критическую температуру, соответствующую точке A_{C_1} на диаграмме

«железо – углерод», то на обработанной поверхности образуется прижог отпуска, а

если температура превышает эту критическую температуру – образуется прижог вторичной закалки. Отпущенная структура имеет

твердость $H_{100} = 6000\text{--}7500$ МПа при исходной твердости до шлифования $H_{100} = 8000\text{--}8500$ МПа, а вторично – закаленный слой имеет твердость $H_{100} = 9000\text{--}10000$ МПа. Под вторично закаленным слоем залегает зона с заниженной твердостью. Подобные слоистые распределения твердости в поверхностных слоях деталей вызывают появление больших растягивающих напряжений, под воздействием которых могут возникнуть шлифовочные трещины. Одним из путей предотвращения появления шлифовочных прижогов является применение абразивных кругов с прерывистой рабочей поверхностью. Для расчета геометрических параметров прерывистых кругов необходимо знать время установления стационарного теплового режима (время теплового насыщения). С момента установления стационарного теплового режима температурные поля не изменяются, и каждая точка обрабатываемой детали проходит через соответствующее распределение изотерм.

Исследованию процесса установления теплового режима при шлифовании посвящены работы [1-6]. Представляет практический интерес установление связи между временем теплового насыщения и параметрами режима шлифования.

Материал и результаты исследований. Для определения времени достижения максимальной температуры (времени теплового насыщения) воспользуемся решением [5]

$$\theta_0 = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi}} \int_0^{Fo} e^{-\frac{\chi^2}{2\tau}} \cdot \Phi(\xi, \tau) \cdot D(Fo - \tau) \cdot \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}}, \quad (1)$$

$$\text{где } \Phi(\xi, \tau) = \operatorname{erf}\left(\frac{\xi + U \cdot \tau + 1}{2 \cdot \sqrt{\tau}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\xi + U \cdot \tau - 1}{2 \cdot \sqrt{\tau}}\right);$$

$$Fo = \frac{a}{h^2} \cdot \tau \quad - \text{число Фурье; } U = \frac{V_d}{a} \cdot h \quad - \text{безразмерная скорость;}$$

$\xi = z/h$ – безразмерная координата вдоль оси z (направление движения теплового источника); $\chi = x/h$ – безразмерная координата вдоль оси x

(вглубь детали); $\tau = \frac{a}{h} \cdot \tau'$ – безразмерный комплекс, характеризующий время действия теплового источника; $D \cdot (Fo - \tau)$ – функция, определяющая закон изменения плотности теплового потока.

Принимая плотность теплового потока постоянной во времени, т. е. $D \cdot (Fo - \tau) = 1$, по формуле (6) произведены расчеты температуры шлифования для различных значений χ : от $\chi = 0$ до $\chi = 1$.

На рис.4 представлено распределение безразмерных температур для $U = 1, 10, 100$.

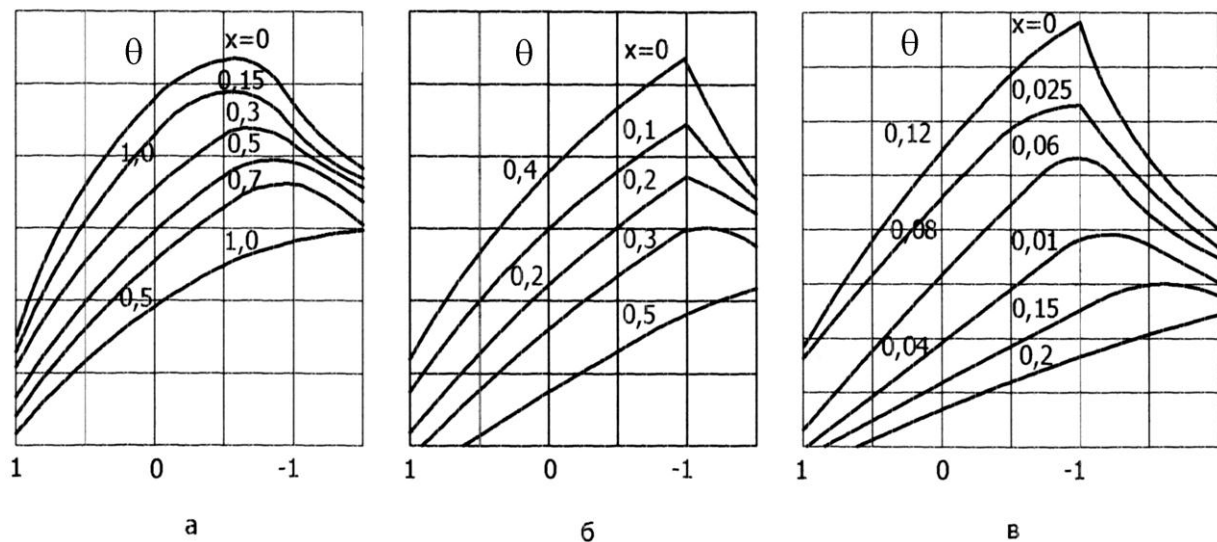


Рисунок 4 – Распределение температуры в полубесконечном теле по глубине для различных безразмерных скоростей $U = 1$ (а); $U = 10$ (б); $U = 100$ (в)

Отрезок по оси ξ (+1, -1) соответствует ширине теплового источника. Из анализа кривых следует, что при любой скорости перемещения теплового источника, точка с максимальной температурой смещается из зоны контакта в сторону противоположную направлению его движения. По кривым рис.6 можно проследить не только величину максимальной температуры, но и время выдержки при данной температуре, т. е. время, в течение которого точка тела будет находиться под воздействием данной температуры. Изменение температуры во времени на поверхности ($\chi = 0$) можно найти из решения уравнения

$$\theta_0 = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi}} \int_0^{Fo} \Phi(\xi, \tau) \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}}. \quad (2)$$

Изменение температуры во времени определяется, главным образом, функцией

$$\Phi(\xi, \tau) = \operatorname{erf}\left(\frac{\xi + U \cdot \tau + 1}{2 \cdot \sqrt{\tau}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\xi + U \cdot \tau - 1}{2 \cdot \sqrt{\tau}}\right). \quad (3)$$

По мере перемещения теплового источника в направлении оси z аргументы функций erf (3) будут возрастать за счет изменения τ . При возрастании аргумента функция erf быстро стремится к единице. Например, при величине аргумента $\left|\frac{\xi \pm 1 + U \cdot \tau}{2 \cdot \sqrt{\tau}}\right| = 3$ значение функции erf отличается от единицы лишь на 0,002%.

С возрастанием τ функция $\Phi(\xi, \tau)$ (3) стремится к нулю и рост интеграла (2) прекратится. Физически это означает, что с течением времени температура, достигнув максимума, прекратит дальнейшее увеличение, т. е. наступит тепловое насыщение.

Следует заметить, что в различных точках ξ вдоль направления движения теплового источника процесс насыщения наступает не одновременно.

Момент насыщения зависит от скорости V_d движения зоны контакта круга с деталью, ширины зоны резания h и температуропроводности шлифуемого материала a . В качестве примера на рис. 5 представлена зависимость изменения функции $\Phi(\xi, \tau)$ от безразмерного времени (числа Фурье) Fo для безразмерной скорости (число Пекле) $U = 1$.

Сплошная кривая соответствует точке с координатами $\xi = -1$, $\chi = 0$, т. е. на задней кромке теплового источника. Штриховая кривая отражает изменение функции $\Phi(\xi, \tau)$ в точке, удаленной за источником на расстоянии восьми его полуширин $\xi = -9$, $\chi = 0$.

Левая шкала рис. 5 соответствует изменению функции $\Phi(\xi, \tau)$ в точке $\xi = -9$, правая в точке $\xi = -1$. В обоих случаях функция $\Phi(\xi, \tau)$ стремится к нулю.

Если принять время теплового насыщения соответствующее функции $\Phi(\xi, \tau) = 0,04$, что соответствует 2% от максимальной температуры, то получим время насыщения для безразмерной скорости $U = 1$

$$Fo|_{\xi=-1} = 14; \quad Fo|_{\xi=-9} = 22,$$

а для $U=100$

$$Fo|_{\xi=-1} = 0,0245; \quad Fo|_{\xi=-9} = 0,109.$$

(4)

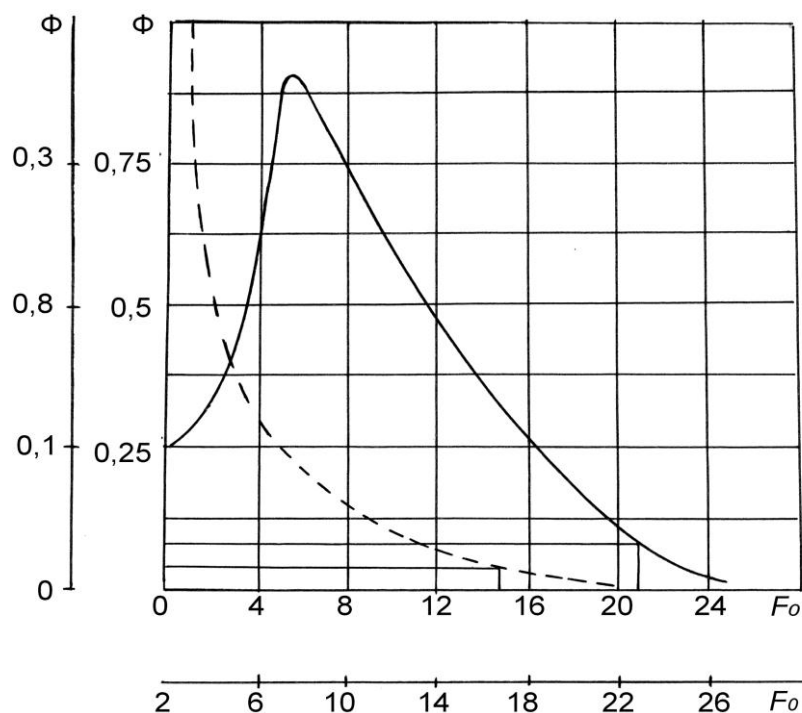


Рисунок 5 – Изменение $\Phi(\xi, \tau)$ во времени
для $\xi=-9$, $\chi=0$ (штриховая кривая), $\xi=1$, $\chi=0$ (сплошная кривая)

Результаты вычисления аргумента второй функции erf в (4) дают следующие значения (см. табл).

Таблиця

ξ	$U=1$	$U=100$
-1	1.6	1.44
-9	1.27	1.36

Из таблицы следует, что для выбранного условия насыщения $\Phi(\xi, \tau) = 0,04$ аргумент второй функции erf не превосходит числа 1,6 для всех значений U в интервале $1 \leq U \leq 100$ и точек поверхности $-9 < \xi < -1$. Поэтому установившийся тепловой режим на поверхности полубесконечного тела от постоянно действующего теплового источника может быть приближенно определен из условия

$$\frac{\xi + U \cdot Fo_{\text{н}} - 1}{2 \cdot \sqrt{Fo_{\text{н}}}} = A. \quad (5)$$

Из выражения (5) в общем виде имеем

$$Fo_{\text{н}} = \frac{4 \cdot A^2 + 2 \cdot U \cdot (1 - \xi) + 2 \cdot A \cdot \sqrt{4 \cdot A^2 + 4 \cdot U \cdot (1 - \xi)}}{2 \cdot U^2}. \quad (6)$$

Принимая $A=1,6$ получим

$$Fo_{\text{н}} = \frac{10,24 + 2 \cdot U \cdot (1 - \xi) + 3,2 \cdot \sqrt{4 \cdot U \cdot (1 - \xi) + 10,24}}{2 \cdot U^2}. \quad (7)$$

Из формулы (7) следует, что на задней кромке теплового источника $\xi = -1$ время теплового насыщения определяется из выражения

$$Fo_{\text{н}} = \frac{10,24 + 4 \cdot U + 3,2 \cdot \sqrt{8 \cdot U + 10,24}}{2 \cdot U^2}, \quad (8)$$

а для передней кромки $\xi = +1$, $Fo_{\text{н}} = \frac{10,24}{U^2}$.

В общем случае размерное время насыщения определяется по формуле

$$\tau_{\text{н}} = \frac{h^2}{a} \cdot Fo_{\text{н}}. \quad (9)$$

Для принятого нами условия $A=1,6$ с учетом (7) и (9) размерное время теплового насыщения будет иметь следующий вид

$$\tau_n = \frac{10,24}{2 \cdot V^2} + \frac{h \cdot (1 \pm \xi)}{V} + \frac{3,2}{2 \cdot V^2} \cdot \sqrt{4 \cdot \frac{V \cdot h}{a} \cdot (1 \pm \xi) + 10,24}, \quad (10)$$

где $\xi = z/h$, z – координата точки, мм.

Знак (+) берется для точек, лежащих между передней кромкой теплового источника и его серединой, а (–) – для точек, расположенных от середины источника к задней кромке.

В частном случае для передней ($\xi = 1$) и задней ($\xi = -1$) кромок получим $\tau_n = \frac{10,24 \cdot a}{V^2}$, $\xi = 1$.

$$\tau_n = \frac{10,24}{2 \cdot V^2} + \frac{2 \cdot h}{V} + \frac{3,2}{2 \cdot V^2} \cdot \sqrt{8 \cdot \frac{V \cdot h}{a} + 10,24}, \quad \xi = -1.$$

Таким образом, из теоретического анализа решения (8) получена формула (10) для расчета времени теплового насыщения. Установлено, что время насыщения зависит от положения точки на поверхности тела, скорости перемещения источника тепла V , области его действия $(-h, h)$ и температуропроводности материала детали.

Выводы. Установлена взаимосвязь между параметрами режима шлифования, теплофизическими свойствами обрабатываемого материала и временем теплового насыщения.

Список использованной литературы: 1. Кошин, А.А. Импульсный стохастический характер температурного поля детали в зоне шлифования / А.А. Кошин, А.А. Дьяконов // Прогрессивные технологии в машиностроении. Тематический сборник научных трудов. – Челябинск: Изд.-во ЮурГУ, 2007. – С.6-11. 2. Кошин, А.А. Особенности температурного поля в зоне контакта при обдирочном шлифовании / А.А. Кошин, А.А. Дьяконов, А.В. Сопельцев // Прогрессивные технологии в машиностроении. Тематический сборник научных трудов. – Челябинск: Изд.-во ЮурГУ, 2007. – С.20-24. 3. Лищенко, Н.В. Определение температуры прерывистого шлифования / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, А.В. Якимов // Праці Одеського політехнічного університету: Науковий та науково-виробничий збірник. – Одеса, 2012.

– Вип. 2(39). – С.80-85. 4. Лищенко, Н.В. Температура шлифования при импульсном тепловом потоке на поверхности / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин //Сучасні системи технологій у машинобудуванні: Збірник наукових праць. – Д: ЛІРА. –2015. – С.54-60. 5. Ярмонов, Н.А. Исследование нестационарных тепловых режимов при шлифовании прерывистыми кругами. – Дис... канд. техн. наук – Пермь, 1974. – 225с. 6. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов //– М.: Машиностроение, 1978. – 167с.

Bibliography (transliterated): 1. Koshin, A.A. Impul'snyj stohasticheskij harakter temperaturnogo polja detali v zone shlifovanija /A.A. Koshin, A.A. D'jakonov //Progressivnye tehnologii v mashinostroenii. Tematicheskij sbornik nauchnyh trudov. – Cheljabinsk: Izd.-vo JuurGU, 2007 – S.6-11. 2. Koshin, A.A. Osobennosti temperaturnogo polja v zone kontakta pri obdirochnom shlifovanii / A.A. Koshin, A.A. D'jakonov, A.V. Sopel'cev // Progressivnye tehnologii v mashinostroenii. Tematicheskij sbornik nauchnyh trudov. – Cheljabinsk: Izd.-vo JuurGU, 2007.– S.20-24. 3. Lishhenko, N.V. Opredelenie temperatury preryvistogo shlifovanija /N.V. Lishhenko, V.P. Larshin, A.V. Jakimov // Praci Odes'kogo politehničnogo universitetu: Naukovij ta naukovo-virobnichij zbirnik. – Odesa, 2012. –Vip. 2(39). – S.80-85. 4. Lishhenko, N.V. Temperatura shlifovanija pri impul'snom teplovom potoke na poverhnosti / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin // Suchasni sistemi tehnologij u mashinobuduvanni: Zbirnik naukovih prac'. – D: LIRA. – 2015. – S.54-60. 5. Jarmonov, N.A. Issledovanie nestacionarnyh teplovyh rezhimov pri shlifovanii preryvistymi krugami. – Dis... kand. tehn. nauk – Perm', 1974.– 225s. 6. Sipajlov V.A. Teplovyje processy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverhnosti / V.A. Sipajlov – М.: Mashinostroenie, 1978. – 167s.

УДК 621.9.01:531.3

Ю.В. ЯРОВОЙ, канд. техн. наук,

И.А. ЯРОВАЯ, канд. техн. наук, Одесса, Украина

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИПУСКА ПО УСЛОВИЮ МИНИМУМА УДЕЛЬНОЙ РАБОТЫ РЕЗАНИЯ

Розглянуто критерій «питома робота різання». За умовою мінімізації питомої роботи різання запропоновано метод розподілу припусків на операціях механічної обробки. Встановлено кількісний взаємозв'язок енергетично економічного розподілу припусків з співвідношенням подачі та швидкості різання на двох суміжних переходах технологічної операції.

Рассмотрен критерий «удельная работа резания». По условию минимизации удельной работы резания предложен метод распределения припусков на операциях механической обработки. Установлена количественная взаимосвязь энергетически экономичного распределения припусков с соотношением подачи и скорости резания на двух смежных переходах технологической операции.

The criterion "specific work of cutting" is studied. Method of machining allowance apportion based on condition of specific work of cutting minimizing is provided. The quantitative relationship between energetically economic allowance apportion and correlation of feed and cutting speed for two adjacent steps of technological operation is determined.

Введение. Внедрение новых технологий, современного оборудования, технологического обеспечения направлено на увеличение производительности обработки и улучшение качества изделия. В свою очередь, улучшение качества изделия связано с методами распределения припуска на разных этапах обработки.

Анализ последних достижений и публикаций. Вопросы распределения припуска рассматриваются только для шлифовальных операций [1, 2]. Критерию «удельная работа резания» посвящены работы В.К. Старкова, С.С. Силина [3, 4]. Распределение припуска с учетом достижения минимальной удельной работы резания не изучено.

© Ю.В. Яровой, И.А. Яровая, 2015

Цель статьи. Предложить метод распределения припуска между рабочими ходами технологического перехода по условию минимума суммарной удельной работы резания.

Основной материал. При формообразовании новой поверхности заданного качества удаление припуска с заготовки происходит дискретно, в соответствии с принятым маршрутом обработки. В течение каждого рабочего хода режущего инструмента, приводимого в движение исполнительными органами станка, совершается некоторая работа резания. Результатом этой работы является формирование поверхностей детали со свойствами, отличными от исходных.

Удельную работу резания представим выражением [5]:

$$e = \frac{A}{V}, \quad (1)$$

где A – работа резания, Дж.

В интервале времени обработки работу формообразования выразим через мощность резания:

$$A = \int_0^T N(\tau) d\tau = NT_o, \quad (2)$$

где N – мощность резания, Вт.

Тогда выражение удельной работы резания примет вид:

$$e = \frac{NT_o}{V} = \frac{N}{V/T_o} = \frac{N}{W}. \quad (3)$$

Объемная производительность, характеризующая скорость удаления стружки, определяется по выражению

$$W = stv, \quad (4)$$

где s – подача, мм/об;

t – глубина резания, мм;

v – скорость резания, м/мин.

Подставляя в (3) выражение для объемной производительности (4), получим зависимость для определения удельной работы резания:

$$e = \frac{N}{stv}. \quad (5)$$

Удельная работа резания не связана с размерами заготовки, напрямую не зависит от времени обработки, и следовательно, может использоваться в качестве критерия для сравнения энергетической эффективности альтернативных процессов обработки, а также параметров отдельных операций. После преобразования зависимости (5) в целевую функцию вида $e \rightarrow \min$ ее можно использовать в качестве критерия оптимизации для установления параметров обработки резанием, которые позволяют минимизировать энергетические затраты без потери производительности.

Если мощность резания представить в виде зависимости от режимов резания и параметров режущего инструмента, то выражение (5) приводится к целевой функции вида $e \rightarrow \min$, содержащей в качестве аргументов управляемые факторы. Следует также отметить, что увеличение мощности резания и объемной производительности приводят к уменьшению удельной работы резания.

Представим удельную работу резания в эмпирическом виде [6, 7]:

$$e = C_3 t^{x-1} s^{y-1} v^n K_p. \quad (6)$$

В полученном выражении удельная работа резания является целевой функцией, которая зависит от режимов резания. Это дает возможность выполнить анализ зависимости удельной работы от режимов резания и определить, какой из параметров оказывает большее влияние.

По выражению (5) определяется удельная работа резания для отдельного технологического перехода. Для совокупности технологических переходов в операции или рабочих ходов в переходе:

$$e_{\Sigma} = e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_n = \sum_{i=1}^n e_i, \quad (7)$$

где e_{Σ} – суммарная удельная работа формообразования;

$e_1, e_2, e_3, \dots, e_n$ – удельная работа формообразования каждого технологического перехода (рабочего хода), из которых состоит технологическая операция (переход).

Выражение (7) справедливо также для анализа суммарной удельной работы резания для разработанного технологического маршрута обработки

детали. В этом случае слагаемые $e_1, e_2, e_3, \dots, e_n$ представляют собой удельную работу резания для отдельных технологических операций.

Выражение (7) позволяет перейти от параметрической оптимизации отдельных рабочих ходов к структурной оптимизации элементов технологического процесса. Это дает возможность количественно сравнивать между собой различные способы формообразования поверхностей деталей машин.

Анализ теоретических зависимостей для удельной работы резания показывает, что глубина резания не влияет на рассматриваемый критерий оптимизации. С целью повышения производительности и сокращения потерь энергии на вспомогательные ходы рекомендуется удалять предварительный односторонний припуск за один рабочий ход. Если по каким-либо причинам (наличие литейной корки, ковочных напусков, завышенных припусков) реализовать это затруднительно, необходимо осуществлять несколько последовательных смежных рабочих ходов. В этом случае условие $e_{\Sigma} \rightarrow \min$ будет выполняться лишь при энергетически обоснованном распределении общего припуска между рабочими ходами.

Согласно выражению (7), суммарная удельная работа для двух рабочих ходов (технологических переходов):

$$e_{1,2} = e_1 + e_2 = Ct_1^{x-1} s_1^{y-1} v_1^n + Ct_2^{x-1} s_2^{y-1} v_2^n. \quad (8)$$

Аргументы функции удовлетворяют уравнению

$$z = t_1 + t_2, \quad (9)$$

где z – общий припуск на выполнение первого и второго рабочего хода.

Для поиска оптимального значения распределения глубины резания на первом рабочем ходе (технологическом переходе) выражение (8) должно удовлетворять следующему условию: функция $e_{1,2} = f(t)$ определима и дифференцируема на отрезке $[0; z]$.

Поиск экстремума функции проводим по методу множителей Лагранжа [8]. Составим функцию Лагранжа

$$F(t_1, t_2) = Ct_1^{x-1} s_1^{y-1} v_1^n + Ct_2^{x-1} s_2^{y-1} v_2^n + \lambda(t_1 + t_2 - z), \quad (10)$$

где λ – неопределенный постоянный множитель.

Определив частные производные выражения (6) по аргументам t_1 , t_2 , получаем систему уравнений, которая имеет вид

$$\begin{cases} C(x-1)t_1^{x-2}s_1^{y-1}v_1^n + \lambda = 0 \\ C(x-1)t_2^{x-2}s_2^{y-1}v_2^n + \lambda = 0. \\ t_1 + t_2 = z \end{cases} \quad (11)$$

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

$$t_1 = \frac{z}{1 + \left(\frac{v_2^n}{v_1^n} \cdot \frac{s_2^{y-1}}{s_1^{y-1}} \right)^{\frac{1}{x-2}}}. \quad (12)$$

Функция (12) имеет общий вид для всех операций механической обработки. Подставляя в нее значения показателей степеней [103], получаем выражение для определения глубины резания на первом рабочем ходе (технологическом переходе). Для обработки на токарных станках функция (12) примет вид

$$t_1 = \frac{z}{1 + \frac{v_{2,0,15}^{0,15}}{v_{1,0,15}^{0,15}} \cdot \frac{s_{2,0,25}^{0,25}}{s_{1,0,25}^{0,25}}}. \quad (13)$$

Например: при общем припуске $z = 3$ мм припуск на черновой этап составит $t_1 = 1,75$ мм ($v_1 = 200$ м/мин, $s_1 = 0,5$ мм/об), а припуск на чистовой этап $t_2 = 1,25$ мм ($v_2 = 300$ м/мин, $s_2 = 0,1$ мм/об).

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

Выводы. Предложен метод распределения припуска между рабочими ходами технологического перехода по условию минимума суммарной удельной работы формообразования. Установлена количественная взаимосвязь энергетически экономичного распределения припусков с соотношением подачи и скорости резания на двух смежных переходах технологической операции.

Список использованных источников: 1. Якимов А.В. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов, Н.А. Поршаков, В.И. Свищев, В.П. Ларшин – Киев: Техніка, 1983. – 184 с. 2. Калафатова Л.П. Оптимизация технологического процесса шлифования ситаллов / Л.П. Калафатова, С.А. Поезд // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр.. Вип. 111/2010. Серія Машиноприладобудування та транспорт – Севастополь, 2010. – С. 75-80. 3. Старков В.К. Физика и оптимизация резания металлов / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с. 4. Силин С.С. Оптимизация операций механической обработки по энергетическим критерия / С.С. Силин, А.В. Баранов // Станки и инструменты. – 1999. – № 1. – С. 16-17. 5. Остафьев В.А. Диагностика процесса металлообработки / В.А. Остафьев, В.С. Антонюк, Г.С. Тымчик. – К.: Техника, 1991. – 152 с. 6. Грановский Г.И. Обработка результатов экспериментальных исследований резания металлов / Г.И. Грановский. – М.: Машиностроение, 1982. – 112 с. 7. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение-1, 2001. – Т. 2. – 944 с. 8. Гусак А.А. Справочник по высшей математике / А.А. Гусак, Г.М. Гусак, Е.А. Бричикова. – Мн.: ТетраСистемс. – 1999. – 640 с.

Bibliography (transliterated): 1. Jakimov A.V. Upravlenie processom shlifovaniya / A.V. Jakimov, N.A. Porshakov, V.I. Svishhev, V.P. Larshin – Kiev: Tehnika, 1983. – 184 s. 2. Kalafatova L.P. Optimizacija tehnologicheskogo processa shlifovaniya sitallov / L.P. Kalafatova, S.A. Poezd // Visnik SevNTU: zb. nauk. pr.. Vip. 111/2010. Serija Mashinopriladobuduvannja ta transport – Sevastopol', 2010. – S. 75-80. 3. Starkov V.K. Fizika i optimizacija rezaniya metallov / V.K. Starkov. – M.: Mashinostroenie, 2009. – 640 s. 4. Silin S.S. Optimizacija operacij mehanicheskoy obrabotki po jenergeticheskim kriterija / S.S. Silin, A.V. Baranov // Stanki i instrumenty. – 1999. – № 1. – S. 16-17. 5. Ostaf'ev V.A. Diagnostika processa metalloobrabotki / V.A. Ostaf'ev, V.S. Antonjuk, G.S. Tymchik. – K.: Tehnika, 1991. – 152 s. 6. Granovskij G.I. Obrabotka rezul'tatov jeksperimental'nyh issledovanij rezaniya metallov / G.I. Granovskij. – M.: Mashinostroenie, 1982. – 112 s. 7. Spravochnik tehnologa-mashinostroitelja: v 2-h t. / Pod red. A.M. Dal'skogo, A.G. Suslova, A.G. Kosilovoj, R.K. Meshherjakova. – M.: Mashinostroenie-1, 2001. – T. 2. – 944 s. 8. Gusak A.A. Spravochnik po vysshej matematike / A.A. Gusak, G.M. Gusak, E.A. Brichikova. – Mn.: TetraSistems. – 1999. – 640 s.

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.9.025

Ю.Н. ВНУКОВ, д-р техн. наук, **Е.Б. КОЗЛОВА**,
Э.В. КОНДРАТЮК, канд. техн. наук, Запорожье, Украина

О ВЛИЯНИИ PVD ПОКРЫТИЙ НА УСЛОВИЯ РЕЗАНИЯ, ИЗНОС И СТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТА

У статті описаний взаємозв'язок контактних характеристик і параметрів стружкообразовання при різанні. Показаний вплив PVD покриття на основні характеристики процесу різання, знос і стійкість інструменту при обробці конструкційних железоуглеродистых, нержавеющей сталей, жароміцного сплаву на нікелевій основі.

В статье описана взаимосвязь контактных характеристик и параметров стружкообразования при резании. Показано влияние PVD покрытия на основные характеристики процесса резания, износ и стойкость инструмента при обработке конструкционных железоуглеродистых, нержавеющей сталей, жаропрочного сплава на никелевой основе.

The article describes the relationship of the contact characteristics and parameters of chip formation during cutting. Shows the effect of PVD coatings on the basic characteristics of cutting process, wear and tool life when machining iron, stainless steels, heat-resistant alloy based on Nickel.

Нанесение тонких вакуумно-плазменных покрытий (пленок), толщиной не более 5 мкм, на поверхности режущего инструмента позволяет во многих случаях повысить стойкость инструмента, либо увеличить режимы резания. Это приводит к повышению экономической эффективности механической обработки. Однако для определения областей и условий эффективного применения инструмента с покрытиями необходимо знать особенности процесса резания и роль покрытия в формировании этих условий.

1. ВЗАИМОСВЯЗЬ КОНТАКТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ

Одним из основных достижений в изучении механики процесса резания является установление и экспериментальное подтверждение того факта, что при резании металлов, в связи с наличием свободной поверхности (наружная сторона стружки) происходит приспособляемость основного очага деформации (зоны стружкообразования) к условиям взаимодействия прирезцової стороны стружки с передней поверхностью инструмента в контактной зоне (рис. 1). Считается, что свойства материала инструмента влияют на процесс стружкообразования значительно меньше, чем свойства обрабатываемого материала. Однако заметное влияние на параметры стружкообразования оказывают *теплопроводность инструментального материала и его контактная активность*. Теплопроводность действует преимущественно через среднюю температуру контакта, а контактная активность между материалом инструмента и обрабатываемым материалом через коэффициент трения [1]. **Основное влияние на коэффициент трения оказывает адгезионная активность между инструментальным и обрабатываемым материалами, под которой понимают способность инструментального материала к схватыванию или химическому соединению с материалом стружки во время ее движения по передней поверхности.**

Прочно соединенные с поверхностью инструмента, тонкие пленочные покрытия, могут иметь различный химический состав и способны существенно влиять на адгезионную активность между инструментом и стружкой и таким образом, оказывать влияние на изменение, как условий стружкообразования, так и условий изнашивания инструмента.

На рис. 1 приведена упрощенная схема стружкообразования (с одной плоскостью сдвига) на основании которой проведен анализ влияния покрытия на основные контактные характеристики процесса резания. К основным контактным характеристикам относят *среднюю температуру контакта* – $\overline{\Theta}^{\circ}\text{C}$, *длину контакта стружки с передней поверхностью* –

C , удельную силу трения по передней поверхности – q_f и среднее контактное давление – q_n .

В качестве главного из параметров процесса стружкообразования принимают усадку стружки, определяемую коэффициентом ее утолщения

$$K_a = \frac{a_{cmp}}{a} \quad (1)$$

где a – толщина среза, a_{cmp} – толщина стружки.

Если экспериментально измерить значение сил P_1 и P_2 , длину контакта – C и усадку стружки K_a , то из рис. 1 можно рассчитать:

– среднее контактное давление на передней поверхности:

$$q_n = \frac{P_1 \cos \gamma - P_2 \sin \gamma}{b_{cmp} C} \quad (2)$$

– средний коэффициент трения на передней поверхности:

$$\mu = \frac{P_1 \operatorname{tg} \gamma + P_2}{P_1 - P_2 \operatorname{tg} \gamma} \quad (3)$$

– удельную силу трения на передней поверхности:

$$q_f = q_n \cdot \mu \quad (4)$$

где P_1 – вертикальная составляющая силы резания, Н, P_2 – горизонтальная составляющая силы резания, Н, γ – передний угол инструмента, град, C – длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента, мм, b_{cmp} – ширина стружки, мм.

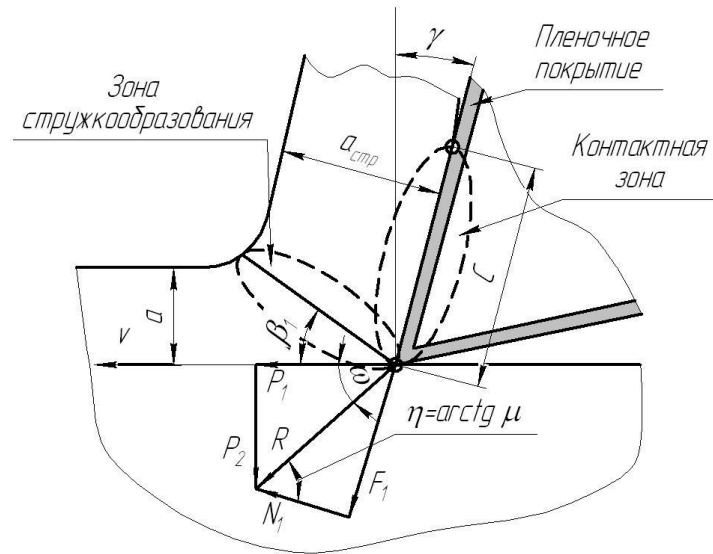


Рисунок 1 – Упрощенная схема стружкообразования
(в главной секущей плоскости – P_T):

P_1, P_2 – вертикальная и горизонтальная составляющие силы резания на передней поверхности, Н; N_1, F_1 – нормальная и сила трения на передней поверхности, Н; R – сила стружкообразования, Н;
 C – длина контакта стружки с передней поверхностью, мм;
 β_1 – угол наклона условной плоскости сдвига, град; ω – угол действия, град;
 η – угол трения, град; μ – средний коэффициент трения; a – толщина среза, мм;
 $a_{стр}$ – толщина стружки, мм; v – скорость резания, м/с

Установлена простая связь [1] между процессами, происходящими в зоне стружкообразования и на контактной поверхности в виде зависимости (5).

$$\frac{C}{a} = K_a^l \quad (5)$$

где C – длина контакта на передней поверхности; a – толщина среза;
 K_a – коэффициент утолщения стружки; l – показатель степени.

Наличие этой связи позволяет экспериментально доказать, что адгезионная активность между материалом тонкого пленочного покрытия и обрабатываемым материалом может оказывать существенное влияние на формирование важнейших параметров процесса резания и определять работоспособность инструмента.

2. ВЛИЯНИЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

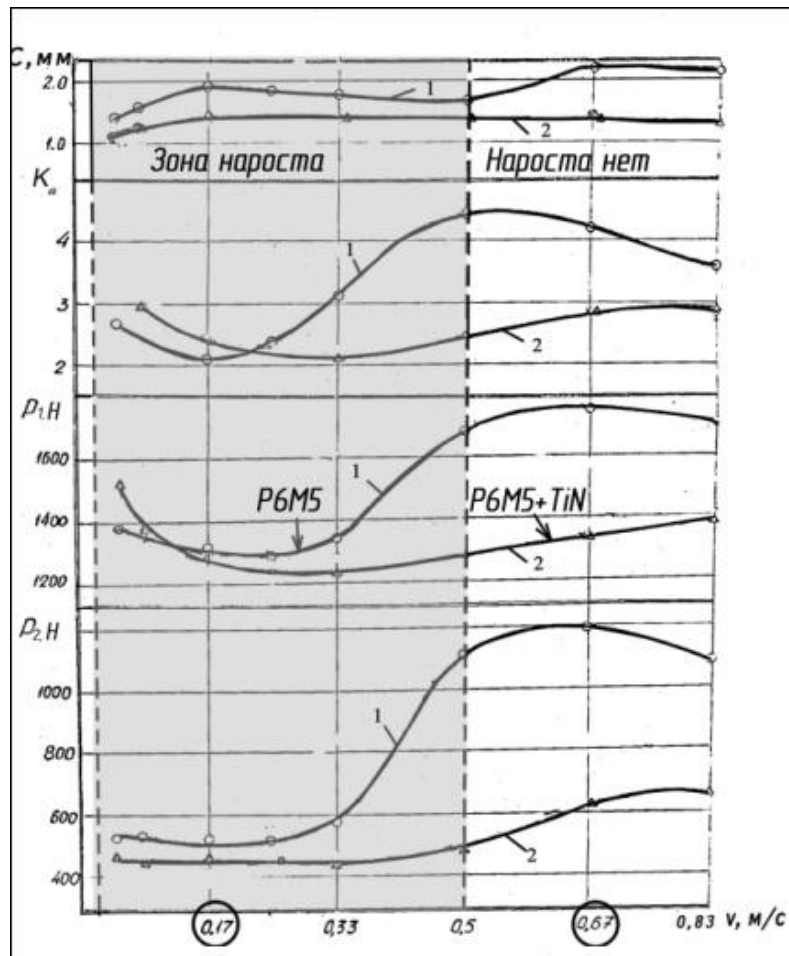
На рис. 2 представлены экспериментальные результаты измерения длины контакта стружки с передней поверхностью – C , усадки стружки – K_a , вертикальной – P_1 и горизонтальной – P_2 составляющих силы резания, при точении стали 45 режущими пластинами из быстрорежущей стали P6M5 без покрытия и с покрытием TiN (P6M5+TiN) в широком скоростном диапазоне $v=0,017...0,83$ м/с. Покрытие TiN имеет золотой цвет, высокую микротвердость, износостойкость и прочность сцепления с подложкой и в течение многих лет является базовым вакуумно-плазменным пленочным покрытием для режущего инструмента. Для инструмента без покрытия получены классические «типичные» кривые [2], на которых при скоростях ниже $v=0,5$ м/с наблюдается резкое снижение усадки стружки K_a и составляющих сил резания P_1 и P_2 . Это снижение связано с формированием нароста, который увеличивая фактический передний угол γ_f уменьшает объемы пластических деформаций при стружкообразовании. При увеличении скорости выше зоны вырождения нароста $v>0,5$ м/с снова наблюдается постепенное снижение K_a , P_1 , P_2 .

При резании инструментом с покрытием величины K_a , P_1 , P_2 и C значительно меньше, чем у инструмента без покрытия.

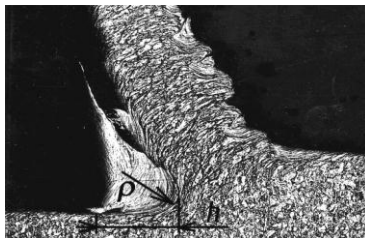
Совместное рассмотрение графиков и фото подтверждает, что при изменении скорости резания процессы стружкообразования протекают по разному. В зоне низких скоростей происходит наростообразование, а с увеличением скорости выше $v=0,5$ м/с нарост вырождается. Покрытие оказывает существенное влияние на форму и размеры нароста, приводит к уменьшению высоты нароста – h и радиуса его вершины – ρ , повышает его устойчивость от разрушения по сравнению с наростом на инструменте без покрытия. При скоростях резания инструментом с покрытиями выше зоны наростообразования $v=0,67$ м/с, толщина стружки – $a_{стр}$ значительно меньше,

чем без покрытия, а отношение $K_a = \frac{a_{стр}}{a}$ и определяет усадку стружки.

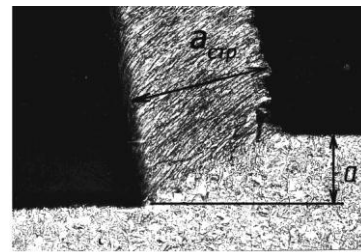
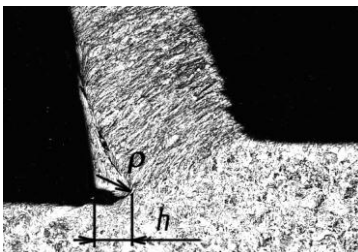
Принципиальная схема влияния покрытия на контактные условия и стружкообразование при точении Сталь 45 приведена на рис. 3 для скоростей выше зоны наростообразования.



1. Инструмент P6M5



2. Инструмент P6M5+TiN



$v=0,17$ м/с

$v=0,67$ м/с

x63

Рисунок 2 – Влияние покрытия TiN на характер «типичных» кривых и условия стружкообразования: 1 – P6M5, 2 – P6M5+TiN.

Свободное ортогональное точение Сталь 45. Режимы обработки:
толщина среза $a=0,3$ мм, ширина среза $b=1,5$ мм, $\gamma=10^\circ$, $\alpha=8^\circ$

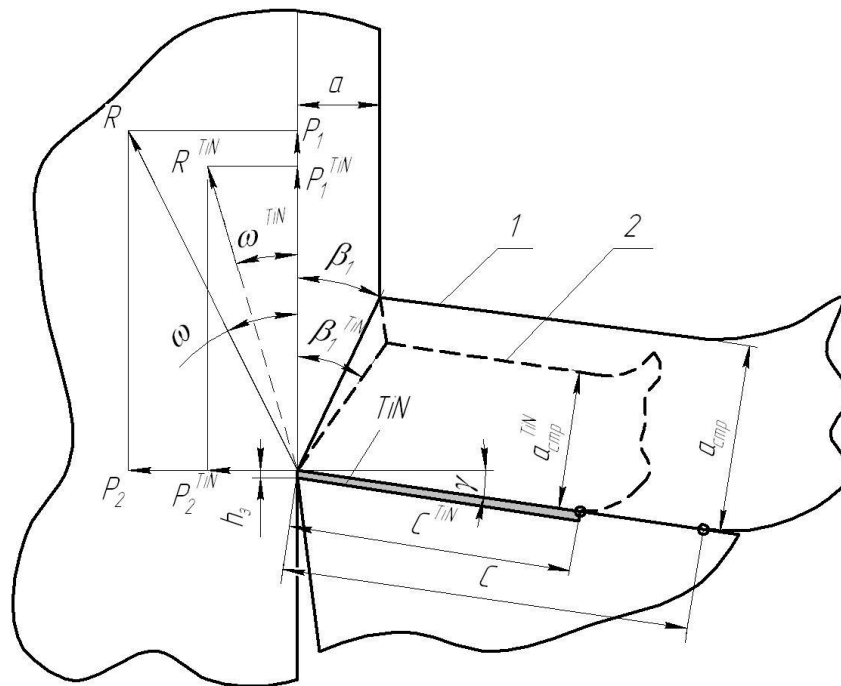


Рисунок 3 – Схема стружкообразования при точении Стали 45:

1 – Инструмент без покрытия – P6M5;

2 – Инструмент с покрытием – P6M5+TiN; R – сила стружкообразования, Н;

ω – угол действия, град; β_1 – угол наклона условной плоскости сдвига, град

Можно видеть, что на инструменте с покрытием уменьшается сила стружкообразования R и уменьшается угол действия этой силы – ω . Однако, при этом, увеличивается угол наклона условной плоскости сдвига – β_1 , который определяет величину площади сдвига, уменьшая ее размеры, снижая усадку стружки – K_a .

Приведенная схема показывает, что процесс резания инструментом с износостойким покрытием TiN протекает энергетически более выгодно, чем без покрытия т.е. с меньшей затратой работы на пластическое деформирование срезаемого слоя в стружку. Следствием этого является меньшее количество тепла, выделяемого при работе инструментом с покрытием. На рис. 4 показано распределение контактной температуры на передней поверхности при точении Стали 45 инструментом с покрытием и без, а также максимальные $\Theta_{\max}$ и средние $\bar{\Theta}$ температуры контакта, рассчитанные по методике А.Н. Резникова [3].

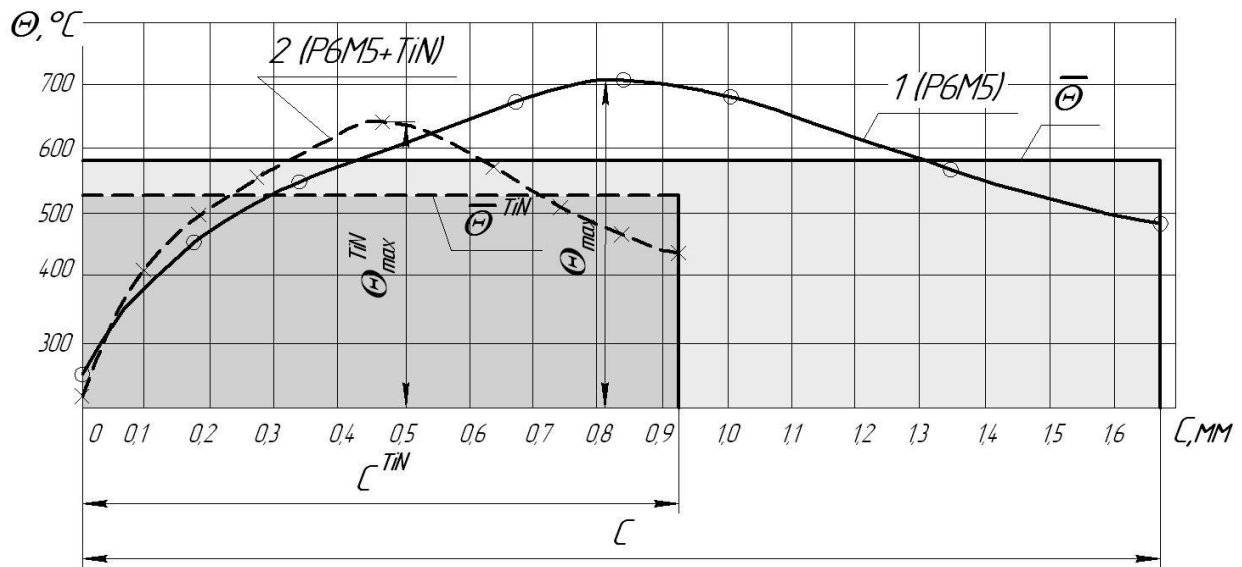


Рисунок 4 – Распределение контактных температур $\Theta = f(C)$ на передней поверхности инструмента при точении Стали 45:
1 – P6M5, 2 – P6M5+TiN

$\Theta_{\max}^{TiN}$, $\Theta_{\max}$, $\bar{\Theta}^{TiN}$, $\bar{\Theta}$ – максимальные и средние контактные температуры на передней плоскости инструмента с покрытием и без покрытия (Условия эксперимента: $v=1$ м/с, $a=0,27$ мм, $b=1,4$ мм, без СОЖ)

Результаты расчетов показывают, что средние $\bar{\Theta}$ и максимальные контактные температуры $\Theta_{\max}$ на инструменте с покрытиями на 50 - 60°C ниже, чем без покрытия. Однако, если распределения контактных температур расположить в одном масштабе длины контакта, то видно, что на инструменте с покрытием на участке приближающемся к режущей кромке температуры на 50° C выше. Эти результаты показывают, что несмотря на то, что общее количество тепла, выделяемое при резании инструментом с покрытием становится меньше, снижая среднюю и максимальную контактные температуры, но из-за существенного сокращения длины контакта C , зона инструмента примыкающая к режущей кромке нагревается сильнее, поэтому теплостойкость инструментального материала на которую наносится покрытие должна быть высокой. На рис. 5 показаны распределения нормальных контактных напряжений σ рассчитанных по методике Н.Н. Зорева [4].

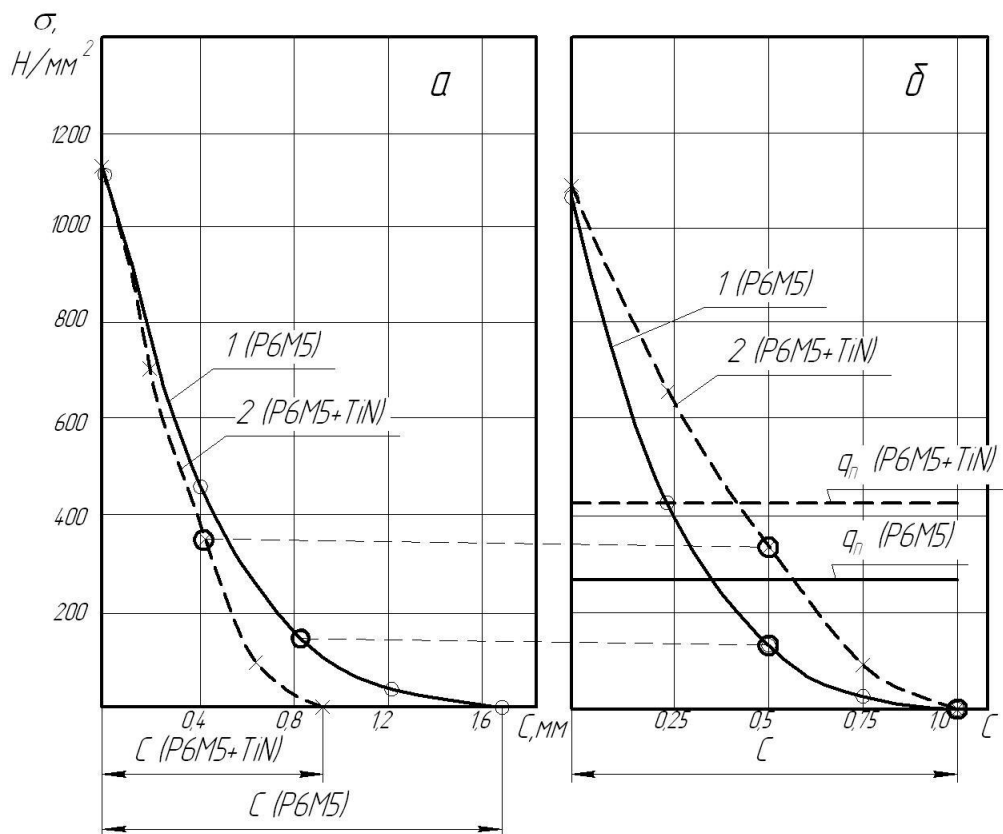


Рисунок 5 – Распределение нормальных напряжений σ на передней поверхности инструмента при точении Стали 45:

1 – P6M5, 2 – P6M5+TiN

q_n – среднее контактное давление;

а – в реальном масштабе длины контакта стружки с передней поверхностью;

б – длина контакта – C для инструмента с покрытием и без покрытия принята за единицу $C=1$

(Условия резания показаны на рис. 4)

При расчете нормальных напряжений σ учитывают измеренные значения сил P_1 и P_2 и длину контакта C . Распределение напряжений в реальном масштабе длины контакта стружки C для инструмента с покрытием и без показано на рис. 5а, по которому видно, что силы резания на инструменте с покрытием меньше. Однако, если рассмотреть распределение нормальных напряжений на контактных площадках разных инструментов, длину которых принять за единицу $C=1$, то можно видеть, что нормальные напряжения σ на равных долях участков контакта у инструментов с покрытиями выше. Естественно выше и среднее

контактное давление – q_n . Этот важный результат, *более высокого среднего контактного давления на инструменте с покрытиями*, позволяет объяснить особенности возникновения заторможенного слоя в лунке износа инструмента с покрытиями (рассмотренного в п. 3), приводящего к повышению его стойкости. Таким образом, **несмотря на снижение сил P_1 и P_2 при резании инструментом с покрытиями, среднее контактное давление стружки на переднюю поверхность – q_n выше из-за более интенсивного сокращения длины контакта – C .**

Удельная сила трения по передней поверхности q_f является малоизменяемой величиной для каждого обрабатываемого материала и в основном определяется сопротивлением этого материала сдвигу.

Поэтому, средний коэффициент трения – $\mu = \frac{q_f}{q_n}$ зависит от уровня

среднего контактного давления q_n которое может изменяться в широких пределах при изменении условий контактирования.

На рис. 6 приведены расчетные значения среднего коэффициента трения стружки μ на передней поверхности. Видно, что у инструмента с покрытием значение $\mu=0,65$ ниже, чем у инструмента без покрытия $\mu=0,88$, но это снижение связано с повышением контактного давления q_n .

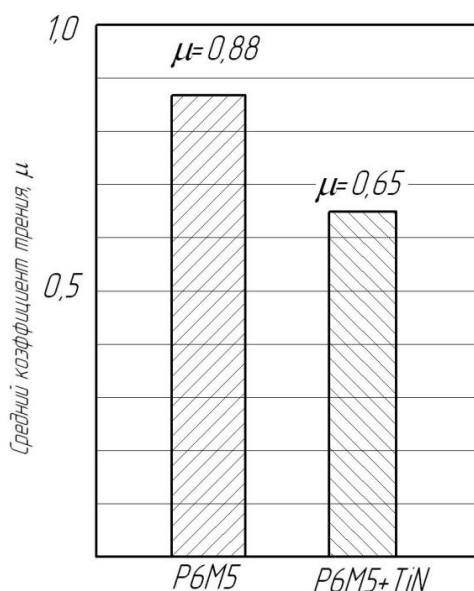


Рисунок 6 – Средний коэффициент трения на передней поверхности – μ при точении Стали 45 (условия резания на рис. 4)

Сокращение длины контакта – C и уменьшение толщины стружки – $a_{стр}$ формирует стружку с меньшим диаметром завивания (рис. 7). Таким образом, показано, что тонкие (≤ 5 мкм) пленочные покрытия нанесенные на поверхность режущего инструмента способны существенно изменять условия контактирования со стружкой и влиять на ее образование. Причиной этому является **изменение условий трения**.



Рисунок 7 – Вид стружки при точении Стали 45:
а – P6M5, б – P6M5+TiN

Для подтверждения этого важного вывода приведены результаты еще одного эксперимента [5], в котором на инструмент после нанесения покрытия TiN (не вынимая его из вакуумной камеры) сверху был нанесен дополнительный тонкий адгезионно активный слой (АСС) материала близкого по химическому составу с обрабатываемым материалом – Сталью 45.

Таким образом, на поверхности инструмента было сформировано двухслойное покрытие (TiN+АСС). На рис. 8 представлены резцы с покрытиями которые имеют различную адгезионную активность к обрабатываемому материалу.



Рисунок 8 – Резцы с покрытиями:
а – P6M5+TiN (низкая адгезионная активность);
б – P6M5+TiN+АСС (высокая адгезионная активность)

Результаты исследований (рис. 9) показывают, что адгезионная активность поверхностного слоя инструмента, который контактирует со стружкой, существенно влияет на условия резания. Тонкий адгезионно-активный к обрабатываемому материалу поверхностный слой покрытия в зоне скоростей выше наростообразования увеличивает длину контакта – C , усадку стружки – K_a и составляющие силы резания P_1 и P_2 .

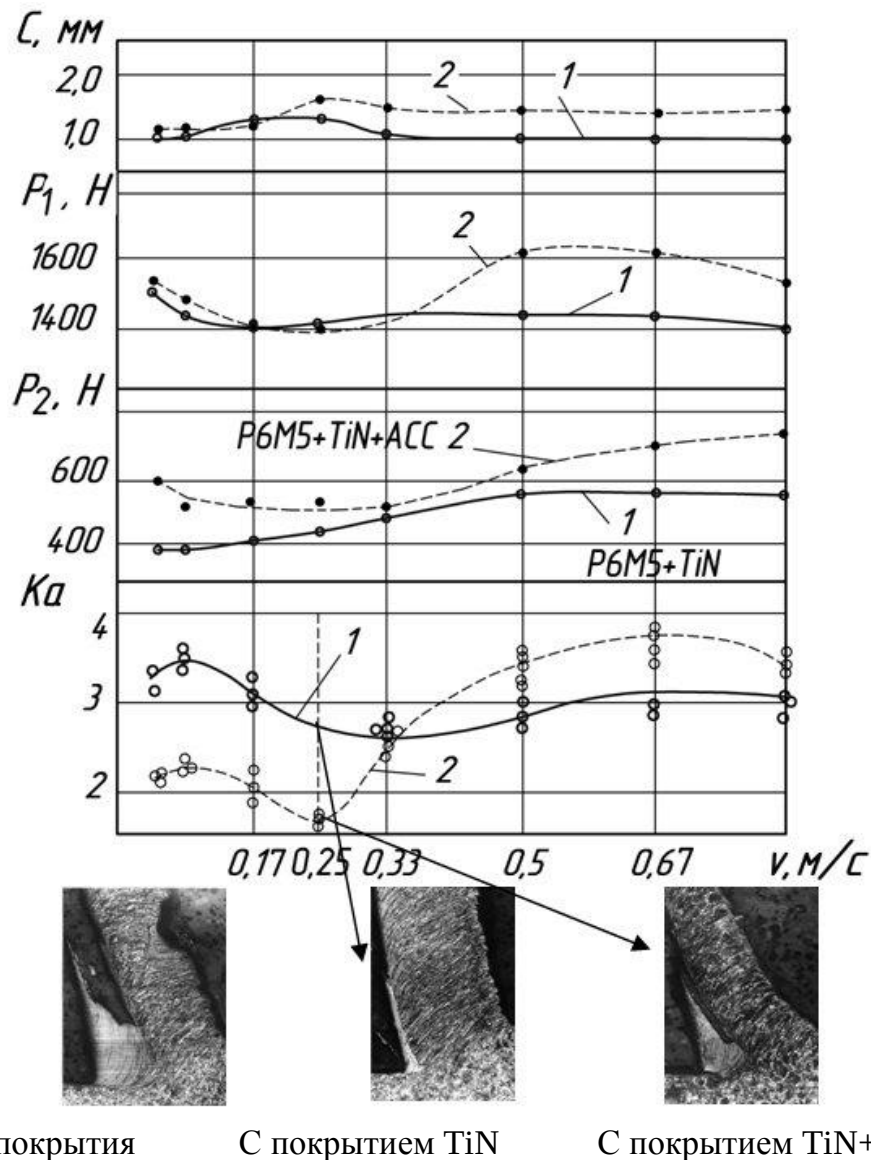


Рисунок 9 – Влияние адгезионно активного слоя (АСС) покрытия на характер «типичных» кривых и наростообразование:

1 – P6M5+TiN, 2 – P6M5+TiN+ACC

Условия эксперимента: свободное ортогональное точение Стали 45, $a=0,3$ мм, $b=1,5$ мм, $\gamma=10^\circ$, $\alpha=8^\circ$, $v=0,017...0,83$ м/с

Корни стружек, полученные на скорости $v=0,25$ м/с, при которой наблюдается максимальная высота нароста на инструменте без покрытия, на инструменте с покрытием TiN показывает резкое снижение высоты нароста, а при нанесении на покрытие TiN дополнительного АСС высота нароста снова существенно увеличивается.

Итак, приведенные результаты исследований показывают, что **тонкие поверхностные контактные слои инструмента способны изменять условия трения и существенным образом влиять на условия стружкообразования.**

Однако условия трения на передней поверхности инструмента зависят от величины нормального напряжения – σ со стороны стружки, которое постепенно снижается при удалении от вершины. Обычно между стружкой и передней поверхностью инструмента на различных участках имеют место два вида трения, различные по своей природе (рис. 10, а).

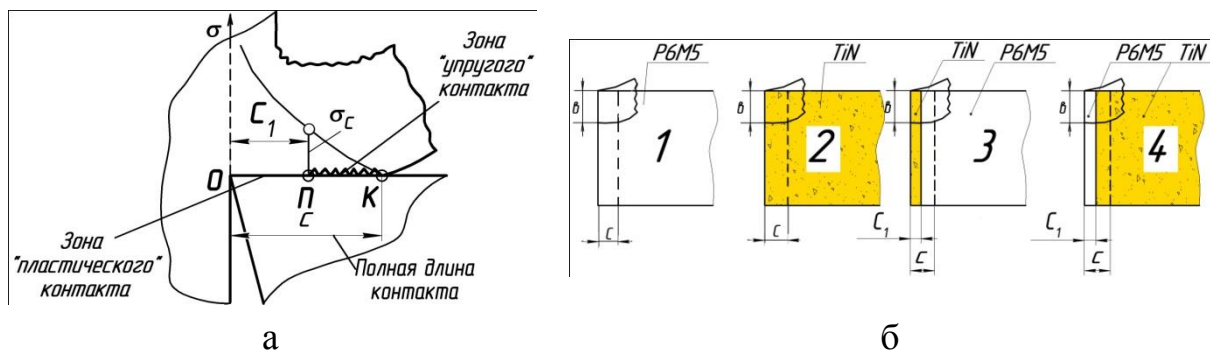


Рисунок 10 – Условия контактирования стружки с передней поверхностью инструмента:

- а – двухзонная модель трения, σ_c – граничное нормальное напряжение;
 б – варианты передней поверхности с зонами различной адгезионной активности

В первой зоне – оп, прилегающей к режущей кромке инструмента, нормальное напряжение σ столь значительное, что наблюдается сплошной контакт между материалом стружки и передней поверхностью, а движение материала стружки проходит за счет внутренних сдвигов в заторможенном слое стружки. Эта часть контакта – C_1 называется зоной «пластического

контакта». Протяженность участка пластического контакта C_1 для Стали 45 составляет 0,4–0,5 от общей длины контакта – C .

Во второй зоне – пк, удаленной от режущей кромки, где нормальное напряжение σ значительно меньше, перемещение стружки сопровождается исключительно внешним скольжением. Разделение контактных процессов в двухзонной модели связано с понятием **граничного нормального напряжения** σ_c , где на участке сплошного «пластического» контакта напряжение выше, а на участке точечного «упругого» контакта – ниже σ_c . Выше показано, что адгезионная активность контактной поверхности инструмента может быть характеристикой изменяющей процесс стружкообразования. Однако важно понимать какая зона «пластического» или «упругого» контакта играет определяющую роль в формировании условий стружкообразования. На рис. 11 приведены «типичные» кривые значений C , K_a , P_1 и P_2 , для инструментов с различными зонами адгезионной активности, показанные на рис. 10, б. Рассматривали 4 варианта: 1 – контактная (передняя) поверхность без покрытия, 2 – контактная поверхность полностью имеет покрытие TiN, 3 – на пластическом участке – C_1 нанесено покрытие – TiN, 4 – на пластическом участке – C_1 отсутствует покрытие – TiN.

Тонкие полоски у режущей кромки в вариантах 3 и 4 позволяют создать различные условия молекулярного схватывания на «пластическом» и «упругом» участках контакта передней поверхности со стружкой. Рассмотрение «типичных» кривых показывает, что кривые влияния основных контактных характеристик и усадки стружки от скорости резания расположились парами, причем наблюдается строгая закономерность состава пары. Пару образуют инструменты с одинаковыми условиями трения на втором – «упругом» участке контакта. Первая пара: варианты 1 и 3 и вторая пара: варианты 2 и 4. У первой пары в зоне «упругого» контакта нет покрытия, а у второй пары имеется. Таким образом, можно утверждать, что **влияние адгезионной активности контактной поверхности инструмента проявляется на «упругом» участке контакта, что и приводит к изменению условий резания.**

В рассмотренном выше случае, *при обработке Стали 45* величина «упругого» участка составляет приметно 0,5–0,6 от общей длины

контакта – C . Однако, это соотношение зависит от вида обрабатываемого материала, причем, чем труднее обрабатывается материал, тем участок «упругого» контакта становится меньше и составляет 0,2–0,1 от общей длины контакта – C или вообще, стружка контактирует с резцом в условиях полного пластического контакта [6].

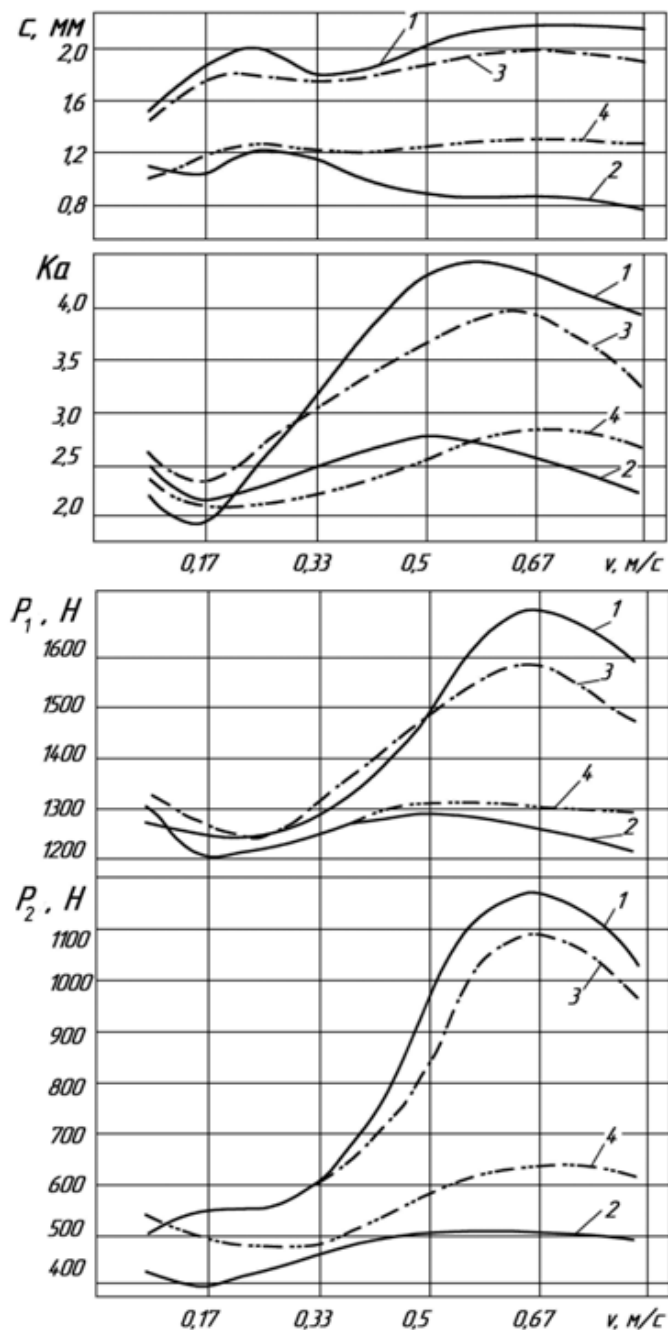


Рисунок 11 – Типичные кривые для инструментов с различными зонами адгезионной активности

Таким образом, если при резании труднообрабатываемых материалов зона «упругого» контакта становится намного меньше зоны «пластического» контакта, то и влияние покрытия на изменение условий трения и стружкообразования должно быть менее значительным или вообще не существенным. В таблице 1 приведены коэффициенты относительной адгезионной активности $K_{адг}$ покрытия из нитрида титана TiN к различным обрабатываемым материалам в сравнении с эталоном из быстрорежущей стали Р6М5. Способ определения $K_{адг}$ подробно описан в работе [7]. Из таблицы видно, что каждый обрабатываемый материал, отличающийся химическим составом друг от друга, имеет различную относительную адгезию к покрытию из нитрида титана. Минимальную относительную адгезию $K_{адг}=0,20$ имеет хромоникелевая сталь на основе железа 12Х18Н10Т, у Стали 45 $K_{адг}=0,33$, у жаропрочного сплава на никелевой основе ХН77ТЮР $K_{адг}=0,82$.

Таблица 1 – Коэффициенты относительной адгезионной активности $K_{адг}$ покрытий из TiN к различным обрабатываемым материалам

Контактная поверхность инструмента	Обрабатываемый материал							
	Сталь45		12Х18Н10Т		ХН77ТЮР		BT1–00	
	$\Delta F/S$	$K_{адг}$	$\Delta F/S$	$K_{адг}$	$\Delta F/S$	$K_{адг}$	$\Delta F/S$	$K_{адг}$
Р6М5 (эталон)	0,140	1,0	0,35	1,0	0,349	1,0	0,485	1,0
TiN	0,046	0,33	0,07	0,20	0,288	0,82	0,603	1,24

где $\Delta F/S$ – удельная сила трения.

Титановый сплав BT1–00 имеет $K_{адг}=1,24$, т.е. схватывается с покрытием TiN активнее, чем с быстрорежущей сталью Р6М5. В табл. 2 приведены значения длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента и усадки стружки для рассмотренных выше обрабатываемых материалов при точении их резцами из быстрорежущей стали Р6М5 с покрытием TiN и без покрытия на различных скоростях резания.

Результаты измерений показывают, что несмотря на различие в активности адгезионного схватывания разных обрабатываемых материалов с покрытием TiN существенный эффект в изменении длины контакта и усадки стружки наблюдается только при точении Стали 45. Из этого

Таблица 2 Влияние покрытия на длину контакта и усадку стружки при точении различных обрабатываемых материалов

Сталь 45					12X18H10T				
Скорость резания, м/с	Длина контакта С, мм		Усадка стружки К _а		Скорость резания, м/с	Длина контакта С, мм		Усадка стружки К _а	
	P6M5	P6M5 +TiN	P6M5	P6M5 +TiN		P6M5	P6M5 +TiN	P6M5	P6M5 +TiN
0,5	1,7	1,30	4,4	2,5	0,166	0,48	0,46	2,42	2,78
0,67	2,2	1,35	4,3	2,9	0,33	0,47	0,43	3,46	3,58
0,83	2,1	1,30	3,6	2,8	0,5	0,46	0,46	2,75	2,90
					0,67	0,49	0,43	2,55	2,53
					0,83	0,42	0,41	2,21	2,16
XH77TЮР					BT1-00				
Скорость резания, м/с	Длина контакта С, мм		Усадка стружки К _а		Скорость резания, м/с	Длина контакта С, мм		Усадка стружки К _а	
	P6M5	P6M5 +TiN	P6M5	P6M5 +TiN		P6M5	P6M5 +TiN	P6M5	P6M5 +TiN
0,018	0,52	0,51	3,06	3,09	0,018	0,15	0,15	1,19	1,22
0,05	0,56	0,54	3,15	3,08	0,083	0,15	0,15	1,11	1,12
0,083	0,56	0,56	2,62	2,61	0,166	0,16	0,16	1,13	1,09
0,166	0,58	0,56	2,79	2,77					

можно сделать важный вывод, что нанесение тонких покрытий на инструмент при резании труднообрабатываемых материалов не оказывает влияния на контактные условия и стружкообразование и поэтому не может быть эффективным приемом повышения их работоспособности. Однако, для большого количества конструкционных и легированных обрабатываемых материалов на основе железа, чугунов и ряда цветных сплавов нанесение тонких покрытий на режущий инструмент является очень эффективным приемом для повышения качества обработки и стойкости инструментов. Объем обрабатываемых материалов, при резании которых наблюдается значительное увеличение работоспособности инструмента с покрытием, составляет 80% от всего объема обрабатываемых материалов,

а для 20% труднообрабатываемых материалов нанесение покрытий на режущий инструмент малоэффективно.

3. ИЗНОС И СТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТА С ПОКРЫТИЕМ

На формирование места расположения и вида очага износа инструмента влияют: свойства обрабатываемого материала, режимы резания (скорость и толщина среза), геометрия инструмента, условия обработки (непрерывное или прерывистое резание, с постоянным или переменным сечением среза), а также адгезионная активность контактной поверхности инструмента к обрабатываемому материалу. Тонкие вакуумно–плазменные покрытия способны существенным образом изменять адгезионную активность контакта, влиять на размеры и место расположения очага износа и изменять условия изнашивания инструмента.

На рис. 12 показан характер износа инструмента из быстрорежущей стали в зависимости от вида обрабатываемого материала при интенсивных режимах обработки.

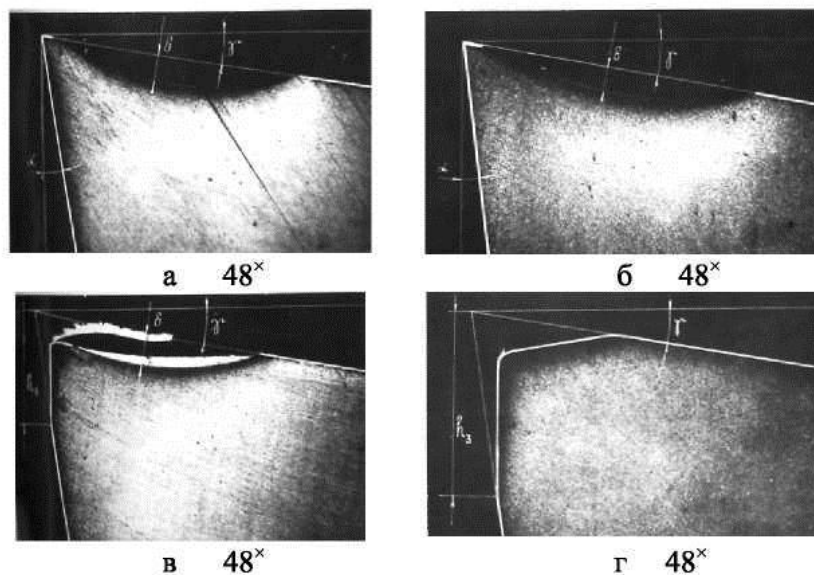


Рисунок 12 – Характер износа инструментов из быстрорежущей стали в зависимости от типа обрабатываемого материала:

- а – точение стали 45 $v=1,17$ м/с, $s=0,26$ мм/об; $T=1$ мин;
- б – точение стали ШХ15 $v=0,75$ м/с, $s=0,26$ мм/об; $T=1$ мин;
- в – точение стали 12Х18Н10Т $v=0,58$ м/с, $s=0,26$ мм/об; $T=1$ мин;
- г – точение сплава ЭИ 437Б $v=0,15$ м/с, $s=0,26$ мм/об; $T=1$ мин

При точении конструкционных железо–углеродистых сталей (Сталь 45 и ШХ15) износ формируется в виде лунки на передней поверхности, при обработке аустенитной нержавеющей стали (12Х18Н10Т) в виде лунки и площадки износа по задней поверхности, а при обработке жаропрочного сплава на никелевой основе ЭИ 437Б(ХН77ТЮР) в виде площадок износа на передней и задней поверхностях с опусканием вершины инструмента.

В табл. 2 показано, что покрытие оказывает влияние на изменение контактных условий и стружкообразование только при обработке железо–углеродистых материалов, поэтому исследование условий формирования очага износа и механизмов изнашивания именно этих материалов имеет важное практическое значение.

Измерение места расположения и размеров очага износа на передней поверхности резцовой пластины производили при быстром выводе ее из зоны точения Стали 45 на специальном устройстве, по схеме приведенной на рис. 13.

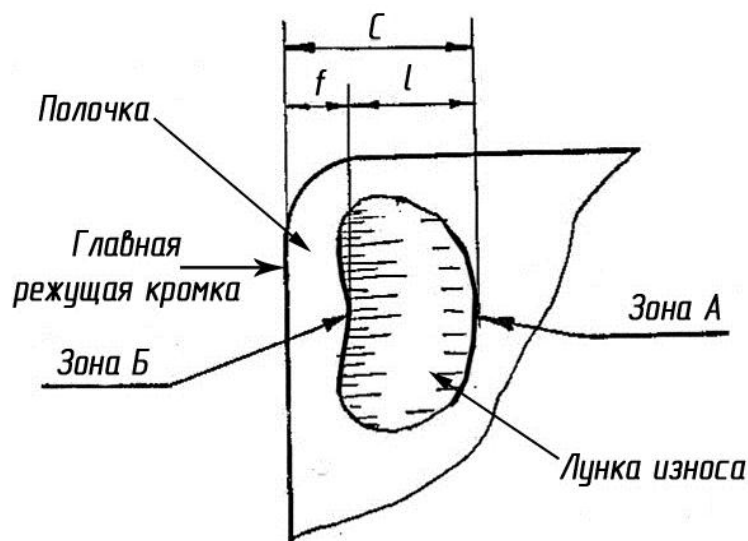


Рисунок 13 – Схема измерения места расположения и размеров очага износа на передней поверхности инструмента при точении Стали 45:

C – длина контакта, мм,
 l – ширина лунки износа, мм, f – ширина полочки, мм

Измеряли длину контакта – C , ширину лунки износа – l и ширину полочки – f . При рассмотрении лунки износа различают зону А – как место отрыва стружки от передней поверхности на выходе ее из лунки износа и зону Б – как место перехода полочки к началу лунки износа.

Формирование и изменение размеров очага износа необходимо рассматривать за определенный период времени т.к. контактные характеристики и условия стружкообразования измеренные в первые минуты резания острозаточенным инструментом (в период, когда лунка еще не сформирована) существенно отличаются от этих характеристик, когда инструмент приработан и находится в состоянии рабочего изнашивания. На рис. 14 показано изменение параметров лунки и усадки стружки при точении Стали 45 до полного теплового затупления резца.

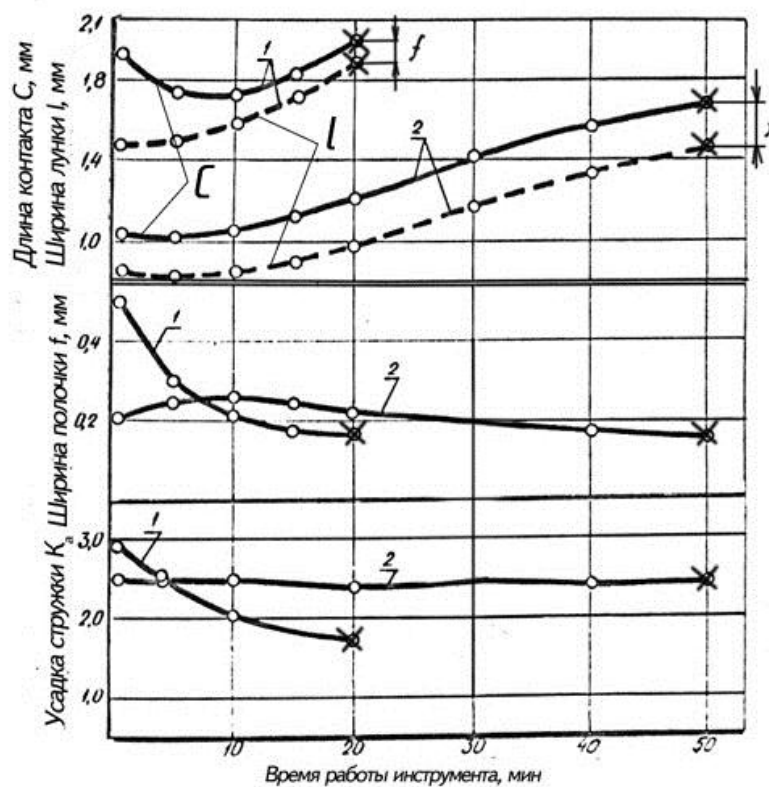


Рисунок 14 – Изменение параметров лунки и усадки стружки по времени при точении Стали 45:

1 – P6M5, 2 – P6M5+TiN

$v = 0,73$ м/с; $s = 0,43$ мм/об; $t = 1,4$ мм; без СОЖ;

х – время полного затупления резца
(период стойкости – T , мин)

Видно, что длина контакта – C и ширина лунки – l у инструмента с покрытием остается меньше на протяжении всего периода стойкости – T . Значения ширины полочки – f и усадки стружки – K_a в первый момент времени больше у инструмента без покрытия, однако, с увеличением времени работы снижаются и после 5 мин, становятся меньше, чем у инструмента с покрытием. Усадка стружки и ширина полочки – f у инструмента с покрытием сохраняется без изменений длительное время.

В данных условиях точения период стойкости инструмента с покрытиями в 2,5 раза выше, чем без покрытия.

Для выяснения механизма повышения стойкости инструмента с покрытиями необходимо знать в какой зоне А или Б, на выходе или входе стружки в лунку износа реализуются износостойкие свойства покрытия. На рис. 15 приведены результаты исследования роста ширины лунки износа и период стойкости для 4-х вариантов передней поверхности инструмента. 1 вариант – передняя поверхность без покрытия, 2 – у режущей кромки на месте полочки нанесена полоска шириной 0,5 мм покрытия TiN, 3 – на месте полочки отсутствует покрытие, а на всей передней поверхности покрытие имеется, 4 – вся передняя поверхность имеет покрытие.

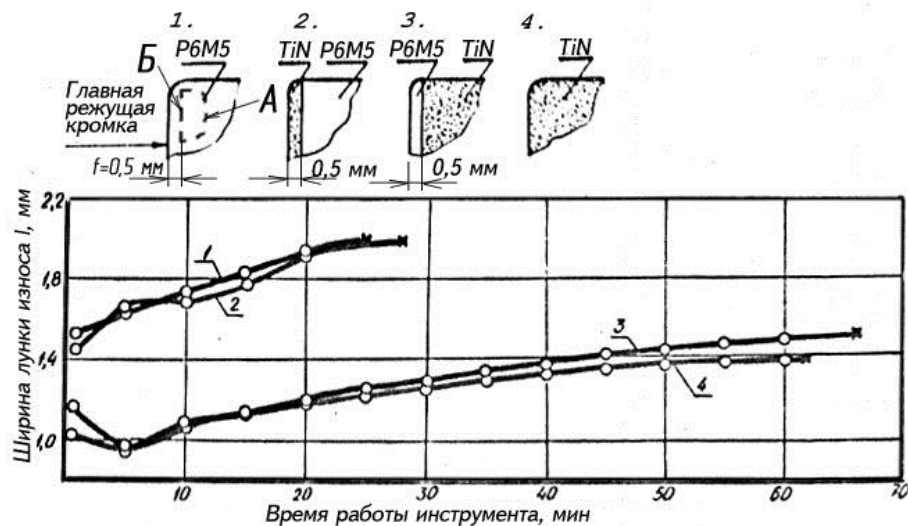


Рисунок 15 – Исследование влияния места нанесения износостойкого покрытия TiN на формирование размеров лунки износа и стойкость резцов при точении Сталь 45:

$v = 0,67$ м/с, $s = 0,43$ мм/об, $t = 1,5$ мм, без СОЖ.

x – время полного затупления инструмента

Приведенные графики однозначно показывают, что роль покрытия реализуется в зоне А, в которой стружка выходит из лунки износа. Кривые расположены парами с одинаковыми контактными условиями в зоне А. Для данных режимов резания покрытие в зоне А в 1,5 раза уменьшает ширину лунки износа и увеличивает стойкость инструмента более 2-х раз. Однако, остается неясным как покрытие толщиной всего ~5 мкм может сдерживать износ инструмента на который с высоким давлением воздействует сходящая стружка. Рассмотрение лунки износа при быстром выводе резца из зоны резания показало, что условия контактирования сходящей стружки с лункой износа принципиально отличаются. В лунке износа у инструмента с покрытием на участке примыкающему к зоне А выхода стружки, образуется устойчивый объем заторможенного обрабатываемого материала, по которому стружка и скользит при выходе из лунки. Это явление наблюдается при обработке разных железоуглеродистых материалов (Стали 45, 30ХГСА, ШХ15СГ) в том числе и при точении с СОЖ (рис. 16–19).

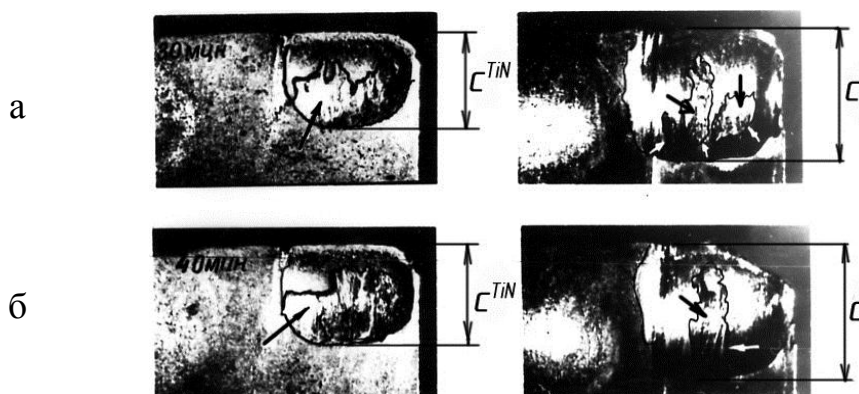


Рисунок 16 – Передняя поверхность инструмента при точении **Стали 45**:
а – 30 мин работы, б – 40 мин работы, $v = 0,73$ м/с, $s = 0,43$ мм/об; $t = 1,5$ мм

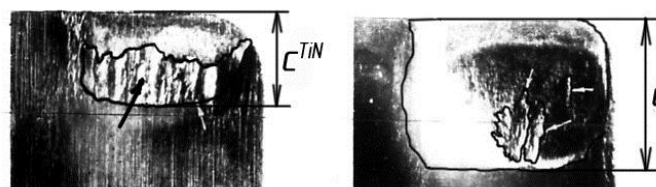


Рисунок 17 – Передняя поверхность инструмента при точении стали **30ХГСА**:
 $v = 0,47$ м/с, $s = 0,43$ мм/об; $t = 1,5$ мм, $\tau = 30$ мин

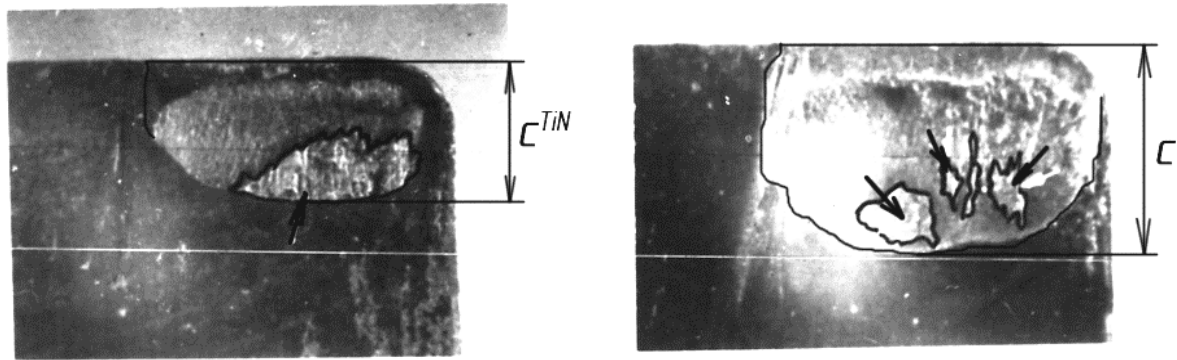


Рисунок 18 – Передняя поверхность инструмента при точении стали ШХ15СГ:
 $v = 0,5$ м/с, $s = 0,43$ мм/об; $t = 1,5$ мм, $\tau = 10$ мин

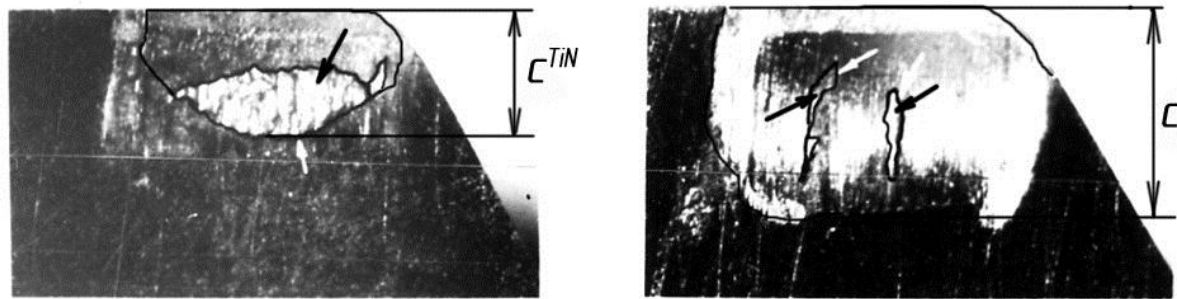


Рисунок 19 – Передняя поверхность инструмента при точении Стали 45 с применением СОЖ:
 $v = 0,83$ м/с, $s = 0,43$ мм/об; $t = 1,5$ мм, $\tau = 5$ мин

В лунке износа у инструмента без покрытия, наблюдается только островки налипов, меняющие свое расположение по всей площади. Различие в условиях контактирования стружки с поверхностью лунки в первую очередь обусловлено уровнем контактного давления определяемого размерами ширины лунки – l . У инструментов с покрытием уровень среднего контактного давления q_n всегда выше из-за меньшей в 1,5 раза длины контакта – C .

Таким образом, заторможенный слой обрабатываемого материала, возникающий в лунке износа у инструмента с покрытием, предохраняет заднюю сторону лунки от контакта со сходящей стружкой и тем самым препятствует ее расширению и изнашиванию.

На рис. 20 приведена принципиальная схема износа инструмента с покрытием при точении железоуглеродистых материалов, на основании которой можно описать механизм повышения стойкости инструмента с покрытием следующим образом:

1. При первом контакте стружки ($\tau \leq 0,5$ мин) с передней поверхностью, у инструмента с покрытием, за счет снижения адгезионного схватывания, уменьшается длина контакта – C , увеличивается угол условной плоскости сдвига β_1 и в связи с этим снижается усадка стружки и сила стружкообразования R . Однако, средние контактные давления – q_n увеличиваются, т.к. сокращение площади контакта за счет уменьшения длины контакта происходит в большей степени, чем снижение составляющих силы резания P_1 и P_2 .

2. Через 0,5-2 мин. работы инструмента происходит прорыв (разрушение) покрытия в месте, начала формирования лунки и стружка начинает контактировать с материалом инструмента. Однако, условия контактного трения в лунке в этом случае отличаются от условий контактирования стружки с инструментом без покрытия более высокими значениями средних контактных давлений q_n .

3. При повышении среднего контактного давления наблюдается полное заторможение контактного слоя стружки, а граница, определяющая ее движение, поднимается выше гребешков микронеровностей инструментального материала, т.е. реализуется пластический сдвиг в материале стружки.

4. Образовавшийся заторможенный слой у инструмента с покрытием плотно прилегает к задней стороне лунки. В этом случае обеспечивается внутреннее трение в материале сходящей стружки.

У инструмента без покрытия задняя стенка лунки свободная от заторможенного слоя, хотя на дне лунки возникают островковые налипы, которые меняют свою конфигурацию, и место расположения во времени, подтверждая их неустойчивость.

Таким образом, **устойчивый заторможенный слой обрабатываемого материала, сформировавшийся у инструмента с покрытием, предохраняет заднюю стенку лунки от контакта со**

сходящей стружкой и отодвигает источники тепловыделения от ее поверхности.

5. Покрытие проявляет свои износостойкие свойства в зоне отрыва стружки от передней поверхности на выходе из лунки (Зона А), сдерживает рост ее ширины. Это позволяет длительное время сохранять высокое нормальное давление стружки и обеспечить устойчивость заторможенных слоев на задней стороне лунки.

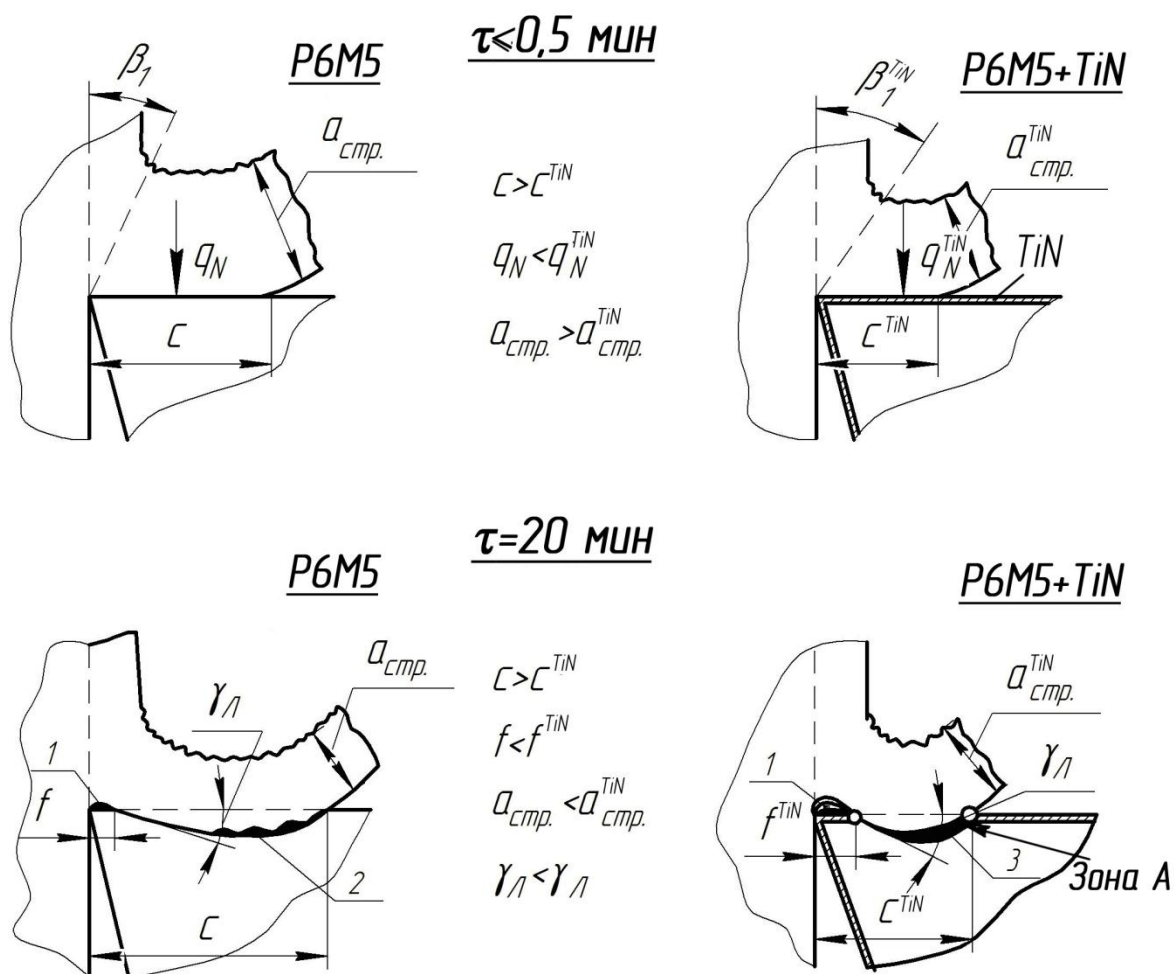


Рисунок 20 – Принципиальная схема изнашивания инструмента с покрытием при точении железоуглеродистых материалов:

- 1 – Застойная зона у режущей кромки;
- 2 – Неустойчивые налипсы в лунке износа;
- 3 – Заторможенный слой обрабатываемого материала

6. Возможность более длительное время сохранять меньшие размеры лунки, позволяет обеспечивать такие условия обтекания стружкой вершины режущего клина, которые способствуют формированию наиболее рациональной формы застойной зоны на полочке у режущей кромки, предохраняющей от износа заднюю поверхность (рис. 21).

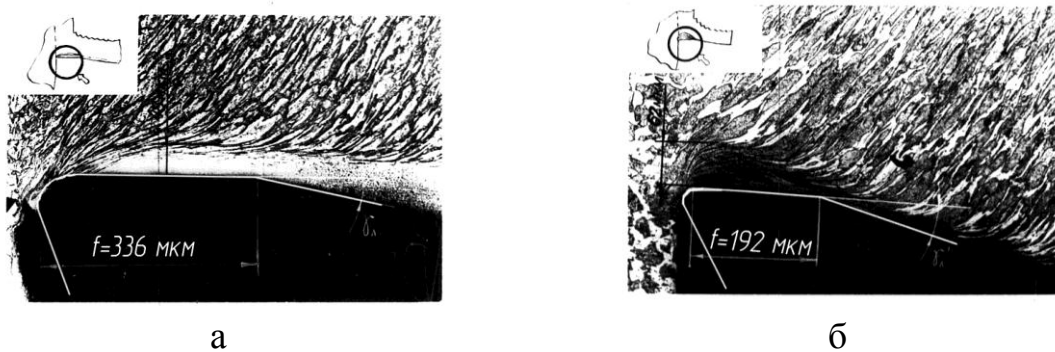


Рисунок 21 – Условия кинематического заторможения (форма застойной зоны) обрабатываемого материала на полочке у вершины резца при точении Стали 45:
а – Р6М5, б – Р6М5+TiN
 $v = 0,67$ м/с, $s = 0,43$ мм/об; $t = 1,4$ мм; $\tau = 5$ мин, без СОЖ

7. Увеличение размеров лунки в сторону выхода стружки изменяет условия обтекания вершины режущего клина стружкой и ведет к уменьшению зоны застоя на полочке и износу полочки, что способствует повышению износа задней поверхности и выходу инструмента из строя.

К сожалению выше описанный механизм повышения стойкости инструментов с покрытиями не реализуется при резании труднообрабатываемых материалов, особенно инструментом из быстрорежущей стали. Покрытие разрушается в первый момент контакта со стружкой, не оказывая заметного влияния на повышение износостойкости. Разрушение покрытия связано со значительным до 4-х раз выше по сравнению с железоуглеродистыми материалами, контактными нагрузками и характерной для этих материалов неустойчивостью пластического течения в зонах контактного трения (рис. 22).



x2000

Рисунок 22 – Вид контактного взаимодействия стружки и передней поверхности инструмента при точении сплава ЭИ787:

$v = 0,033$ м/с; $s = 0,3$ мм/об; $t = 1,5$ мм

Инструментальный материал – Р12МФ5-МП

Износ на передней поверхности происходит без образования лунки и полочки у режущей кромки и устойчивых заторможенных зон, установленных для железуглеродистых материалов.

При точении титановых, а также жаропрочных сплавов ЭИ787 и ЭИ437 (ХН77ТЮР) в широком диапазоне изменения режимов и условий резания инструментом из быстрорежущей стали с различными покрытиями, существенного эффекта не установлено.

Список использованных источников: 1. Полетика М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента / Полетика М.Ф. – М.: Машиностроение. – 1969. – 148 с. 2. Еремин А.И. Физическая сущность явлений при резании сталей / Еремин А.И. – М.: Свердловск. – Машгиз, 1951. – 226 с. 3. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / Резников А.Н. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с. 4. Зорев Н.Н. О взаимозависимости процессов в зоне стружкообразования и в зоне контакта передней поверхности инструмента : Вестник машиностроения, 1963, – №12. – С.42-50. 5. Внуков Ю.Н. Повышение износостойкости быстрорежущих инструментов на основе исследований условий их трения с обрабатываемыми материалами и реализации новых технологических возможностей : дисс. доктора техн. наук / Внуков Юрий Николаевич. – М., 1992. – 371 с. 6. Sata T., Mizuno M. Frictions process on cutting tools and cutting mechanism //Journal scient Research Inst.– June.– Vol. 49.–1955. 7. Нанесение износостойких покрытий на режущий инструмент / Под ред. Внукова Ю.Н. – К.: Техника, 1992. –143 с.

Bibliography (transliterated): 1. Poletika M.F. Kontaktnye nagruzki na rezhushhih poverhnostjah instrumenta / Poletika M.F. – M.: Mashinostroenie. – 1969. – 148 p. 2. Eremin A.I. Fizicheskaja sushhnost' javlenij pri rezanii stalej / Eremin A.I. – M.: Sverdlovsk. – Mashgiz, 1951. – 226 p. 3. Reznikov A.N. Teplofizika processov mehanicheskoy obrabotki materialov / Reznikov A.N. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 279 p. 4. Zorev H.H. O vzaimozavisimosti processov v zone struzhkoobrazovanija i v zone kontakta perednej poverhnosti instrumenta : Vestnik mashinostroenija, 1963, – №12. – P.42-50. 5. Vnukov Ju.N. Povyshenie iznosostojkosti bystrorezhushhih instrumentov na osnove issledovanij uslovij ih trenija s obrabatyvaemymi materialami i realizacii novyh tehnologicheskikh vozmozhnostej : diss. doktora tehn. nauk / Vnukov Jurij Nikolaevich. – M., 1992. – 371 p. 6. Sata T., Mizuno M. Frictions process on cutting tools and cutting mechanism //Journal scient Research Inst.– June.–Vol. 49.–1955. 7. Nanesenie iznosostojkih pokrytij na rezhushhij instrument / Pod red. Vnukova Ju.N.–K.: Tehnika, 1992. –143 p.

УДК 621.9.025

Ю.Н. ВНУКОВ, д-р техн. наук,

Е.Б. КОЗЛОВА,

Э.В. КОНДРАТЮК, канд. техн. наук, Запорожье, Украина

КОНСТРУИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РЕЗАНИЯ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ИНСТРУМЕНТОМ ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

У статті представлені методи оцінки основних експлуатаційних властивостей покриттів: товщини, мікротвердості, міцності зчеплення з підкладкою (інструментальним матеріалом), оцінки зносостійкості покриття в умовах різання. Запропоновані конструкції багатослойних покриттів для інструменту зі швидкорізальної сталі, описані результати порівняльних випробувань на зносостійкість інструменту з різними покриттями для обробки железо-углеродистого матеріалу Сталь 45.

В статье представлены методы оценки основных эксплуатационных свойств покрытий: толщины, микротвердости, прочности сцепления с подложкой (инструментальным материалом), оценки износостойкости покрытия в условиях резания. Предложены конструкции многослойных покрытий для инструмента из быстрорежущей стали, описаны результаты сравнительных испытаний на износостойкость инструмента с различными покрытиями для обработки железоуглеродистого материала Сталь 45.

Methods of an assessment of the main operational properties of coverings are presented in article: thickness, microhardness, durability of coupling with a substrate (tool material), an assessment of wear resistance of a covering in the conditions of cutting. Designs of multilayered coverings for the tool from quick cutting steel are offered, results of comparative tests for wear resistance of the tool with various coverings for processing of the iron-carbonaceous material Steel 45 are described.

Совершенствование современных составов и конструкций вакуумно-плазменных пленочных покрытий ведут путем разработки композиционных или многослойных покрытий с целью получения комплекса их характеристик, превышающих свойства однослойного покрытия.

На рис. 1 приведена принципиальная схема фрикционного узла при резании.

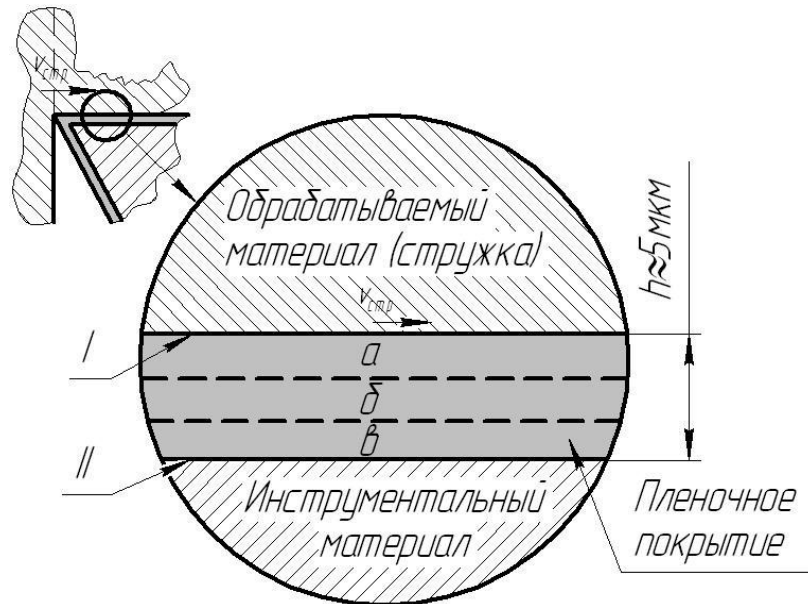


Рисунок 1 – Схема фрикционного узла при резании инструментом с покрытием:

I – граница контакта со стружкой (обрабатываемым материалом);

II – граница сцепления покрытия с инструментальным материалом

У покрытия имеется две контактных границы: со стружкой и с материалом инструмента. На границе I происходят процессы схватывания и износа с подвижной стружкой, а граница II является местом прочного закрепления покрытия на поверхности инструмента.

Если обрабатывается железоуглеродистый материал (Сталь 45) инструментом из быстрорежущей стали, которая по химическому составу также является железоуглеродистым легированным материалом, то к покрытию одновременно предъявляются противоречивые требования. На границе со стружкой схватывание должно быть минимальным, а на границе с инструментальным материалом максимальным. Это техническое противоречие можно решить, создав покрытие с различным комплексом свойств на этих двух границах, либо путем чередования слоев – *многослойное покрытие*, либо постепенным изменением состава по толщине – *композиционное покрытие*.

К верхнему слою (а), контактирующему со стружкой, предъявляется требование минимальной адгезионной активности к обрабатываемому материалу, обеспечивающее минимальное схватывание. К нижнему слою (в), соединенному непосредственно с инструментальным материалом предъявляются требования прочного сцепления. Слой (б) должен иметь высокий уровень износостойкости и прочности и надежно соединять слои (а) и (в). Естественно, слои (а) и (в) также должны обладать достаточной прочностью и износостойкостью.

1 МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОСНОВНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Среди многих видов покрытий тонкие вакуумно–плазменные износостойкие покрытия (пленки) занимают особое место. Эта особенность определяется их незначительной толщиной (не более 5 мкм), высокой микротвердостью, прочностью сцепления с подложкой, а также условиями эксплуатации на режущем инструменте – характеристиками трения в условиях схватывания с обрабатываемым материалом, износостойкостью и др. [1].

1.1 Определение толщины покрытия

Определение толщины покрытия возможно путем прямого обмера размеров напыляемой поверхности перед и после нанесения покрытий, методом металлографических шлифов и целым рядом различных физических методов.

В металлографическом методе образцы или инструмент плотно прижимают напыленными поверхностями к другой поверхности с твердостью, равной твердости подложки (инструмента), и в плоскости перпендикулярной к поверхности напыления изготавливают металлографический шлиф. После его травления (для инструмента из быстрорежущей стали) в 4% растворе азотной кислоты в этиловом спирте износостойкий слой проявляется в виде светлой нетравящейся зоны (рис. 2), который измеряют на металлографическом микроскопе при увеличении $\times 1000$ – 2000 . Недостатком этого метода является необходимость разрушения изделия.

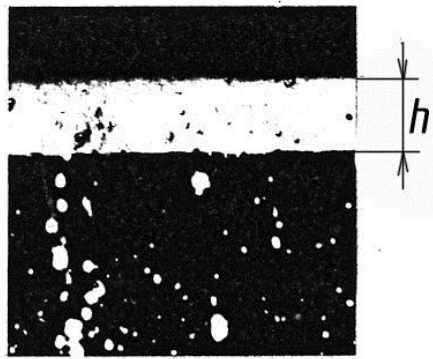


Рисунок 2 – Металлографический метод определения толщины износостойкого слоя (2000 х)

Среди физических методов наиболее распространенным является метод **рентгеноструктурного анализа**. Определение толщины покрытий этим методом основано на ослаблении интенсивности рентгеновского излучения, отраженного от поверхности основного материала инструмента на двух участках с покрытием и без него.

На заводах для определения толщины покрытия TiN используют прибор «Micro-DETM» модели MP-700 (США). Принцип работы прибора следующий (рис. 3).

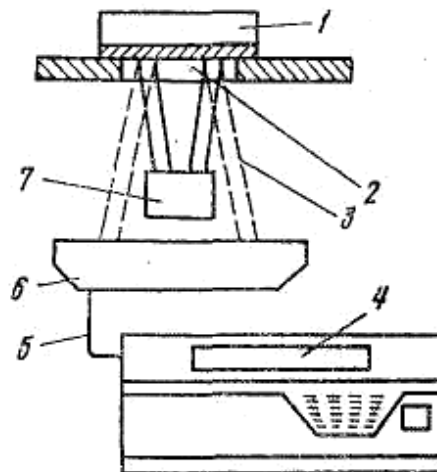


Рисунок 3 – Измерение толщины покрытия с помощью обратного бета-рассеяния на приборе «Micro-DETM» модели MP-700:

1 – образец с покрытием; 2 – отверстие; 3 – бета-лучи; 4 – ЭВМ;
5 – провод зонда; 6 – счетчик Гейгера-Мюллера; 7 – источник бета-излучения

Бета-лучи, испускаемые радиоактивным источником 7, направляются на поверхность образца 1, на которую нанесено покрытие. Некоторые бета-лучи поглощаются образцом, а другие – 3 подвергаются обратному рассеянию или отражаются. Рассеянные бета-лучи обнаруживаются с помощью счетчика Гейгера-Мюллера 6 и передаются в виде электрических импульсов на ЭВМ прибора 4. Зависимость скорости обратного бета-рассеяния от толщины покрытия позволяет проводить непосредственное измерение толщины покрытия.

1.2 Определение микротвердости покрытий

ГОСТ 9450–76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников» устанавливает два метода испытаний: основной – по восстановленному отпечатку и дополнительный – по невосстановленному.

На отечественных приборах ПМТЗ и ПМТ5 можно корректно оценивать микротвердость покрытий с толщиной более 4 мкм, так как минимальная толщина покрытия должна превышать глубину отпечатка не менее чем в 10 раз. Поэтому, для оценки микротвердости тонких покрытий (пленок) необходимо использовать ультрамикротвердомер типа МИКРО–ДЮРОМАТ – 4000. На этом приборе возможно наносить микро и ультрамикротвердые отпечатки в диапазоне усилий от 0,0005 до 2 Н при использовании алмазного наконечника с формой рабочей части в виде бицилиндра.

1.3 Определение прочности сцепления покрытия с подложкой (инструментальным материалом)

В настоящее время наиболее принятым количественным методом определения прочности сцепления твердых тонких покрытий (пленок) с подложкой является метод царапания с переменной нормальной нагрузкой – P (рис. 4).

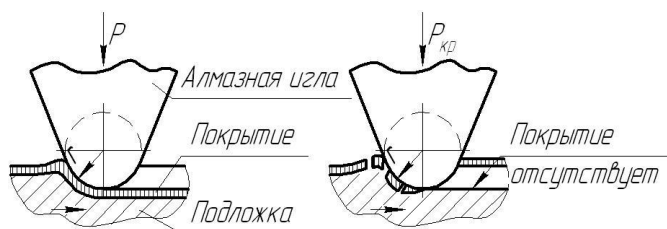


Рисунок 4 – Определение прочности сцепления покрытия с подложкой методом царапания с переменной нормальной нагрузкой – P

Царапающее устройство снабжено алмазной иглой в форме конуса Роквела с радиусом заточки $r = 0,2$ мм. Во время движения (царапания) на алмазную иглу последовательно с шагом в 1 Н от 1 до 150 Н прикладывается нормальная нагрузка P . С ростом нормальной нагрузки, наступает момент, когда покрытие разрушается. **Нагрузка, при которой теряется сцепление покрытия с подложкой называется критической – $P_{кр}$. Величина критической нагрузки является критерием прочности сцепления покрытия с инструментальным материалом.**

1.4 Определение адгезионных свойств покрытий к обрабатываемому материалу

Считается, что общая сила трения, а следовательно, и коэффициент трения складывается из двух составляющих: деформационной и адгезионной. Исходя из этого коэффициент трения равен:

$$f = f_{def} + f_{adg} \quad (1)$$

где f_{def} – деформационная составляющая коэффициента трения;

f_{adg} – адгезионная составляющая коэффициента трения.

Применяя метод определения тангенциальной прочности адгезионной связи полированных поверхностей под нормальной нагрузкой, считают, что деформационная составляющая бесконечно мала и ею можно пренебречь. Тогда при условии сжатия сферы двумя образцами (рис. 5) / 2/ и ее повороте можно определить адгезионную составляющую коэффициента трения по формуле

$$f_{adg} = \frac{3}{4} \frac{F_{экс} R_{экс}}{r_{л} N} \quad (2)$$

где $F_{экс}$ – экспериментально определяемое усилие для поворота индентора, Н;

$R_{экс}$ – радиус поворотного диска, в котором крепится образец со сферическими поверхностями, мм;

$r_{л}$ – радиус лунки от внедрения сферической поверхности образца, мм;

N – нормальная нагрузка, Н.

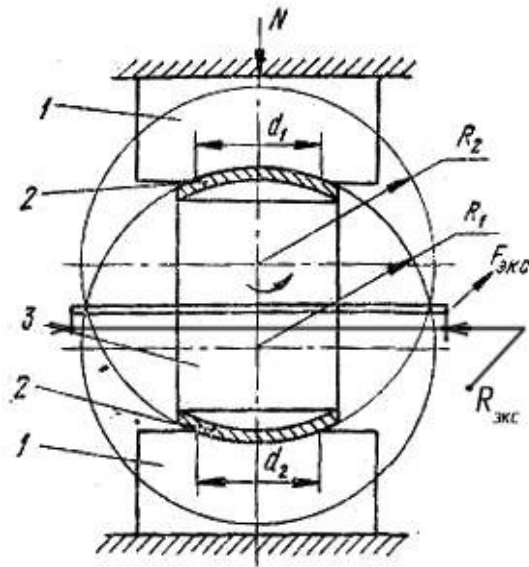


Рисунок 5 – Узел трения:

- 1 – образцы из обрабатываемого материала, 2 – износостойкое покрытие,
 3 – образец из инструментального материала (индентор),
 d_1, d_2 – диаметры лунок вдавливания,
 R_1, R_2 – радиусы шарового индентора, $F_{экс}$ – измеряемая сила трения

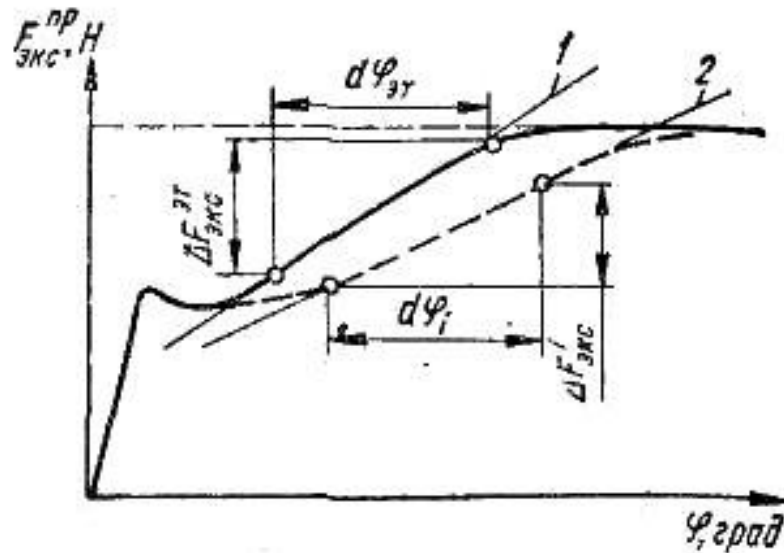


Рисунок 6 – Диаграммы силы трения для различных пар трения:

- 1 – P6M5 – обрабатываемый материал
 2 – TiN – обрабатываемый материал

В предлагаемом методе адгезионная активность фрикционного контакта оценивается уровнем прироста поверхности фактического сдвига при его перемещении:

$$\Delta s = \Delta F_{\text{экс}} / (s \tau_{\text{сд}}) \quad (3)$$

где $\Delta F_{\text{экс}}$ – прирост силы трения при постоянной для всех случаев величине угла поворота $d\varphi_i$ индентора 2 (рис. 6) (определяется экспериментально); $\tau_{\text{сд}}$ – сопротивление обрабатываемого материала сдвигу.

$$\tau_{\text{сд}} = F_{\text{экс}}^{\text{пр}} / s \quad (4)$$

$F_{\text{экс}}^{\text{пр}}$ – предельная сила трения, определяется экспериментально; s – площадь поверхности трения (общая поверхность сферических отпечатков на образцах) фрикционного контакта, рассчитывается по формуле:

$$s = s_1 + s_2 \quad (5)$$

s_1, s_2 – площади поверхности трения индентора с верхним и нижним образцами:

$$s_i = \pi D_i (D_i - \sqrt{D_i^2 - d_i^2}) / 2 \quad (6)$$

D – диаметр шаровой поверхности индентора; d – диаметр отпечатка; $i = 1, 2$.

Для оценки коэффициента относительной адгезионной активности покрытия к обрабатываемому материалу по сравнению с адгезионной активностью подложки к обрабатываемому материалу эксперимент необходимо проводить дважды. Первый раз записывают кривую роста нагрузки $F_{\text{экс}}$ при вращении индентора без покрытия, а второй раз – с покрытием. Измеряя прирост силы трения $F_{\text{экс}}$ на одинаковом угле поворота индентора $d\varphi$, а также диаметры шаровых поверхностей D_1 и D_2 и лунок d_1 и d_2 , рассчитывают **коэффициент относительной адгезионной активности** – $K_{\text{адг}}$.

$$K_{\text{адг}} = \frac{\Delta s_i}{\Delta s_{\text{эп}}} \quad (7)$$

где $s_i, s_{\text{эп}}$ – адгезионная активность соответственно индентора с износостойкой пленкой и подложкой (быстрорежущей сталью) к обрабатываемому материалу.

Контактные поверхности образцов получают по методике изготовления металлографических шлифов. Перед экспериментом поверхности образцов тщательно обезжиривают четыреххлористым углеродом и протирают пудрой из активированного угля.

1.5 Оценка износостойкости покрытия в условиях резания

На рис. 7 показана схема испытаний на износостойкость инструментального материала 3 или покрытия 4 с различной адгезионной активностью при трении стружкой 5 в условиях постоянства формы и размера застойной зоны 2. Измерение износа производят профилографированием на профилографе-профилометре модели ВЭИ-201 «Калибр» при вертикальном увеличении 1000 х и горизонтальном 80 х.

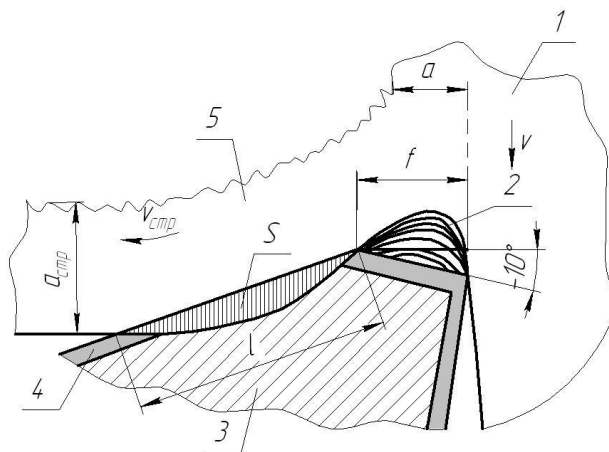


Рисунок 7 – Схема испытаний покрытий на износостойкость при резании:

- 1 – обрабатываемый материал, 2 – застойная зона,
3 – резцовая пластина из быстрорежущей стали, 4 – покрытие, 5 – стружка,
S – площадь очага износа

Сохранение постоянства формы и размеров застойной зоны – 2 для инструментальных материалов с различной адгезионной активностью достигается путем создания на передней поверхности отрицательной фаски - $f = (1,5 - 2)a$. Это является важнейшим условием повышения точности определения способности пленки противостоять износу при трении стружкой.

Для определения износостойкости покрытий разных составов, нанесенных на быстрорежущую подложку, рекомендуют следующие

условия испытаний: точение Стали 45, скорость – $v=0,5\text{ м/с}$, глубина резания – $t=1,5\text{ мм}$, подача – $s=0,43\text{ мм/об}$ ($a = 0,3\text{ мм}$ при $\varphi = 45^\circ$), угол фаски – (-10°) , величина фаски $f = 0,5\text{ мм}$, время испытаний – 10 мин, без СОЖ. Площадь очага износа – S определяют планиметрированием.

Относительную интенсивность износа J при резании Стали 45 определяют отношением $J = \frac{S_{\text{покр}}}{S_{\text{Р6М5}}}$, где $S_{\text{покр}}$ - площадь очага износа инструмента с покрытием, $S_{\text{Р6М5}}$ – площадь очага износа инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 без покрытия.

2. СОЗДАНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ИНСТРУМЕНТА ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОДИСТОГО МАТЕРИАЛА СТАЛЬ 45

Возможности вакуумно-плазменных технологий осаждения различных покрытий очень широки, поэтому целесообразно определить важнейшие эксплуатационные свойства карбидных и нитридных монопленок, нанесенных на инструментальную подложку из быстрорежущей стали Р6М5 на основании которых можно конструировать многослойные или композиционные покрытия.

Свойства нитридных и карбидных покрытий переходных металлов IV-VI групп, измеренные по описанным выше методикам приведены в таблицах 1 и 2. Покрытия наносили в вакуумно-плазменной установке «Булат-3У» толщиной $h=5\text{ мкм}$.

Анализ таблиц 1 и 2 показывает, что нитриды переходных металлов в большей мере, чем карбиды отвечают требованиям, предъявляемым к свойствам покрытий по следующим причинам:

1. Из-за более высокой микротвердости карбидных покрытий они проявляют большую склонность к разрушению, чем нитридные при пластическом деформировании инструментальной подложки в условиях измерения ее твердости по шкале HRC.

2. Нитридные пленки имеют более высокую прочность сцепления с инструментальной основой по сравнению с карбидами. А нитрид циркония ZrN из всех исследованных соединений обладает наиболее высокой критической нагрузкой разрушения, $P_{\text{кр}}=130\text{ Н}$.

3. Более низкое схватывание $K_{адг}$ по отношению к Стали 45 также приходится в основном на нитриды. Аномально низкое схватывание со Сталью 45 получено при трении нитридом ниобия NbN и карбидом молибдена Mo₂C. Однако, существенного повышения износостойкости в процессе резания инструментом с покрытием из карбида молибдена не получено, вследствие его низкой термической устойчивости.

4. Высокими свойствами по износостойкости обладают покрытия TiN, ZrN и NbN, поэтому на их основе были нанесены и испытаны различные многокомпонентные покрытия.

Таблица 1 – Свойства нитридных покрытий (на подложке P6M5)

№ № пп	Тип покрытия	Микро- твердость H_{μ} , Н/мм ²	Прочность сцепления с инстру- ментальным материалом, $P_{кр}$, Н	Коэффициент адгезии с обрабаты- ваемым материалом Сталь 45, $K_{адг}$	Относи- тельная интенсив- ность износа, J при резании Стали 45
1	P6M5 без покрытия	9360	—	1,00	1,000
2	TiN	21750	85	0,33	0,305
3	ZrN	18490	130	0,71	0,309
4	HfN	25000	110	0,54	0,552
5	VN	28140	105	0,37	0,674
6	NbN	31460	70	0,06	0,333
7	CrN	26600	110	0,51	0,536
8	Mo ₂ N	27400	80	0,82	1,003

Таблица 2 – Свойства карбидных покрытий (на подложке P6M5)

№ № пп	Тип покрытия	Микро- твёрдость H_{μ} , Н/мм ²	Прочность сцепления с инструмен- тальным материалом, $P_{кр}$, Н	Коэффициент адгезии с обрабаты- ваемым материалом Сталь 45, $K_{адг}$	Относи- тельная интенсив- ность износа, J при резании Стали 45
1	P6M5 без покрытия	9360	—	1,00	1,000
2	TiC	23860	55	0,58	0,365
3	ZrC	33000	80	2,46	0,375
4	HfC	28650	80	2,14	0,268
5	VC	35230	70	1,05	0,275
6	NbC	37800	55	0,25	0,249
7	CrC	19250	70	0,52	0,622
8	Mo ₂ C	30380	60	0,04	0,781

В табл. 3 представлены результаты испытаний на износостойкость инструмента с многокомпонентными покрытиями. Максимальной износостойкостью при резании Стали 45 обладает покрытие **ZrN-TiN-NbN**, у которого нижний слой выполнен из нитрида циркония, обладающего высокой прочностью сцепления с инструментом, а верхний слой, имеет самое низкое схватывание с обрабатываемым материалом, состоит из нитрида ниобия. Лучший результат показывает покрытие, если между нижним слоем ZrN и верхним – NbN расположен нитрид титана TiN, характеризующийся полной взаимной растворимостью с этими нитридами.

Получено повышение износостойкости инструмента с трехслойным покрытием более 4 раз по сравнению с инструментом без покрытия.

Таблица 3 – Результаты сравнительных испытаний на износостойкость инструмента с различными покрытиями

№ № пп	Тип покрытия	Относительная интенсивность изнашивания, $J=S/S_{P6M5}$
1	P6M5 (без покрытия)	1,000
2	TiN	0,305
3	(Ti, Nb)N - композит	0,315
4	NbN-TiN	0,368
5	TiN-NbN	0,278
6	ZrN-NbN	0,312
7	ZrN-TiN-NbN	0,241

В табл. 4 и 5 приведены результаты промышленных стойкостных испытаний метчиков при нарезании резьбы в Стали 45. Метчики с покрытием **ZrN-TiN-NbN** показали многократное повышение стойкости.

Таблица 4 – Результаты испытаний метчиков M12 при $n_1 = 680$ об/мин

Тип покрытия	Количество обработанных отверстий	Коэффициент повышения стойкости
P6M5 без покрытия	215	1,0
TiN	574	2,7
ZrN-TiN-NbN	976	4,5

Таблица 5 – Результаты испытаний метчиков M12 при $n_2 = 960$ об/мин

Тип покрытия	Количество обработанных отверстий	Коэффициент повышения стойкости
P6M5 без покрытия	22	1,0
ZrN	75	3,4
TiN	126	5,7
ZrN-TiN-NbN	215	9,8

Условия испытаний.

1. Испытания выполнены на вертикально-сверлильном станке модели 2A125 при двух режимах резания.
2. Обрабатываемый материал – сталь 45 твердостью HB210.
3. Диаметр отверстий 10,2 мм, глубина резьбы 15 мм. Нарезание резьбы на проход.
4. Критерий износа – заедание метчика и остановка шпинделя.
5. СОЖ не применяли.

Промышленные испытания сверл, долбяков, а также холодно- и горячевысадочных пуансонов с многослойным покрытием **ZrN-TiN-NbN** при обработке изделий из железоуглеродистых материалов показала повышение стойкости в 1,5 и выше раз по сравнению с однослойным покрытием из нитрида титана – TiN и многократное повышение стойкости по сравнению с инструментом без покрытия.

Список использованных источников: 1. Внуков Ю.Н. Повышение износостойкости быстрорежущих инструментов на основе исследований условий их трения с обрабатываемыми материалами и реализации новых технологических возможностей : дисс. доктора техн. наук / Внуков Юрий Николаевич. – М., 1992. – 371 с. 2. Нанесение износостойких покрытий на режущий инструмент / Под ред. Внукова Ю.Н. – К.: Техника, 1992. –143 с.

Bibliography (transliterated): 1. Vnukov Ju.N. Povyshenie iznosostojkosti bystrorezhushhih instrumentov na osnove issledovaniy uslovij ih trenija s obrabatyvaemymi materialami i realizacii novyh tehnologicheskikh vozmozhnostej : diss. doktora tehn. nauk / Vnukov Jurij Nikolaevich. – M., 1992. – 371 p. 2. Nanesenie iznosostojkih pokrytij na rezhushhij instrument / Pod red. Vnukova Ju.N.–K.: Tehnika, 1992. –143 p.

УДК 621.763

О. Р. ОНИСЬКО, канд. техн. наук, **О. М. БОГАЧЕНКО**,
Л. Я. РОП'ЯК, канд. техн. наук, Івано-Франківськ, Україна

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ АРМУВАННЯ ТІЛ ОБЕРТАННЯ ГРАНУЛАМИ ЛЕГКИХ КАРБІДІВ У ПРОЦЕСІ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ВІДЦЕНТРОВОГО ЛИТТЯ

Описано технологічні аспекти і їх часткове аналітичне підтвердження стосовно процесу електрошлакового відцентрового армування твердосплавними гранулами густина яких є меншою від густини сталюї матриці. Серед аспектів технологічного процесу – застосування гальванічного покриття твердосплавних гранул з метою покращеного змочування останніх у сталюму розплаві, захист твердого сплаву від розчинення у сталі і збільшення питомої густини армуючих гранул. На думку авторів отримана композиція «сталюа матриця – гальванопокриті твердосплавні гранули» може бути застосована для якісного армування периферійної частини бурових інструментів у формі тіл обертання.

Описаны технологические аспекты и их частичное аналитическое подтверждение применительно к процессу электрошлакового центробежного армирования твердосплавными гранулами, плотность которых меньше плотности стальной матрицы. Среди аспектов технологического процесса – применение гальванического покрытия твердосплавных гранул с целью улучшенного смачивания последних в сталюом расплаве, защита твердого сплава от растворения в стали и увеличение удельной плотности армирующих гранул. По мнению авторов полученная композиция «сталюая матрица – гальванопокрытые твердосплавные гранулы» может быть применена для качественного армирования периферийной части буровых инструментов в форме тел вращения.

There are described the technological aspects and their partial analytical confirmation in relation to the process of centrifugal electroslag reinforcement by carbide granules with a density less than the density of the steel matrix. The aspects of the process include the application of the galvanic coating of carbide granules with a view to the improved wetting of the latter in the steel melt, the protection of a hard alloy from dissolving in the steel and increase the specific gravity of the reinforcing granules. According to the authors obtained composition "steel matrix & galvancoated carbide granules" can be applied for the qualitative reinforcement of the peripheral part of boring tools which have the form of bodies of revolution.

© О. Р. Онисько, О. М. Богаченко, Л. Я. Роп'як, 2015

Вступ. Армовані твердим сплавом поверхні бурових інструментів, які експлуатуються в умовах абразивного чи ударно-абразивного навантажень є широко розповсюдженими у практиці нафтогазової індустрії, а також їх застосовують при проходженні тунелів і шахтних виробітків. Одним із способів армування є технологічний процес відцентрового армування, під час якого гранульований твердий сплав подається разом зі сталним розплавом у обертову ливарну форму, а під дією відцентрових сил гранули переміщуються до її країв. Упродовж кристалізації виливка у периферійній його частині формується об'ємна композиція твердосплавних гранул і сталної матриці [1].

Актуальність проблеми. В силу різних обставин запропонований технологічний процес має ряд суттєвих недоліків. У першу чергу він потребує твердосплавного матеріалу густина якого значно перевищує густину сталного розплаву. По друге у процесі переміщення гранул у рідкому сталному середовищі відбувається їхня взаємодія, у результаті якої грануляція зменшуються, а стална матриця вбирає у себе надмірну кількість вуглецю, набуваючи надлишкової крихкості. Як результат процес вимагає дороговартісних витрат гранульованого карбиду вольфраму і при цьому не забезпечує достатньо стійку до викришування матрицю.

Метою даної роботи є визначення технологічних аспектів, що задовольнятимуть створення об'ємного композиційного утворення «стална зв'язка – легко-твердосплавні гранули» у периферійній області виливка отриманого у процесі відцентрового електрошлакового лиття.

Аналіз останніх досліджень. Одним із способів уникнення вказаних вище недоліків є застосування електрошлакового відцентрового литва. Армований на своїй периферії виливок отримують шляхом подачі твердосплавних гранул у розплав шлаку, який фактично є транспортним середовищем, що спричиняє відцентрове переміщення гранул, густина яких є більшою від густини шлаку, але може бути меншою від густини сталі [2, 3]. На рис. 1 показані виливки отримані на базі лабораторного електрошлакового композиційного відцентрового обладнання ІФНТУНГ. Маса вказаних деталей досягає 1 кг. Діаметр 160 мм. Форма профілю відповідає профілю породоруйнівних дисків, що застосовували на бурових прохідних комбайнах типу «Robbins 151-191».



Рисунок 1 – Загальний вигляд лабораторних виливків отриманих у процесі електрошлакового відцентрового композиційного лиття

На рис. 2-4 схематично відображено означений вище технологічний процес. Спочатку із дозатора у шлак подається певна кількість гранульованого твердого сплаву, що потрапляє у рідкий шлак, що виливається із тигля у форму, що обертається (рис. 2). Під дією відцентрових сил гранули твердого сплаву переміщуються до периферії.

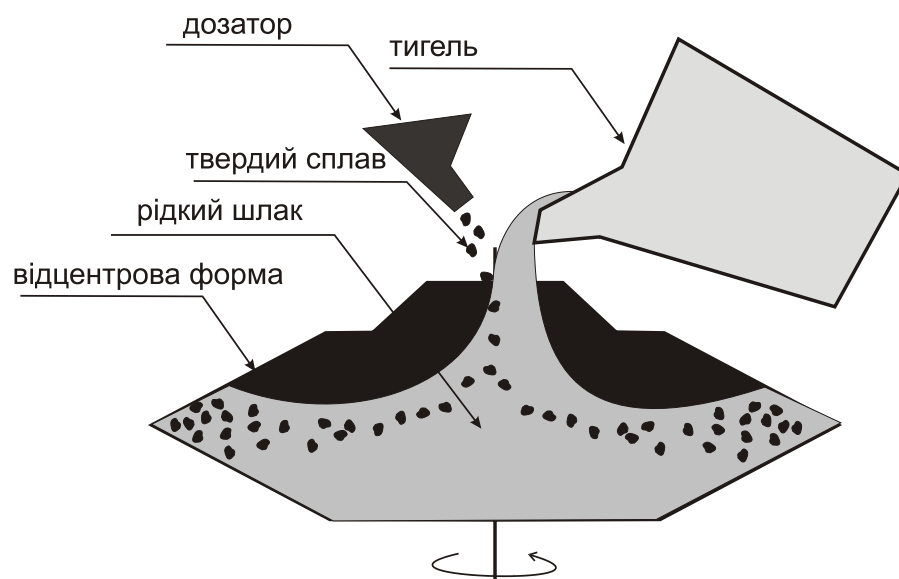


Рисунок 2 – Схема процесу подачі твердосплавних гранул у розплав шлаку

Наступним етапом вказаного технологічного процесу є подача із тигля сталю розплаву, що поступово витісняючи легкий шлак у верхню частину форми (рис. 3). У цей момент усі гранули зібрані на периферії у середовищі рідкого шлаку, густина якого менша за густину гранул.

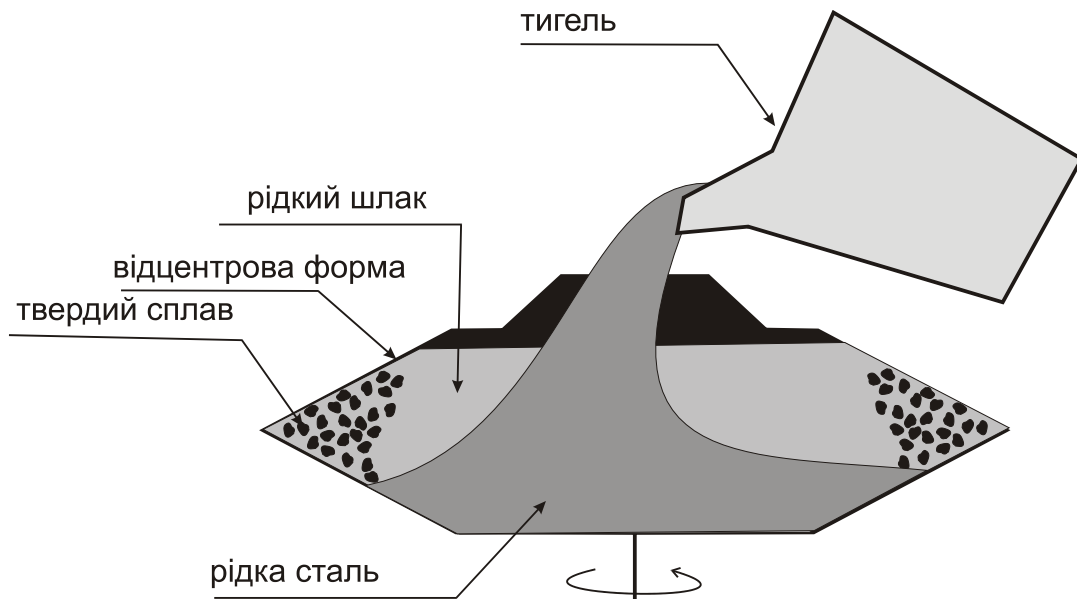


Рисунок 3 – Схема початку процесу подачі сталю розплаву у обертову форму

Поступово сталю розплав витісняє легший шлак до центра форми, при цьому гранули потрапляючи у середовище із більшою ніж у рідкої сталі густиною розпочинають доцентровий рух. Після кристалізації помітним стає менш щільне розміщення гранул у сталю матриці, ніж це було у шлаковому середовищі (рис. 4).

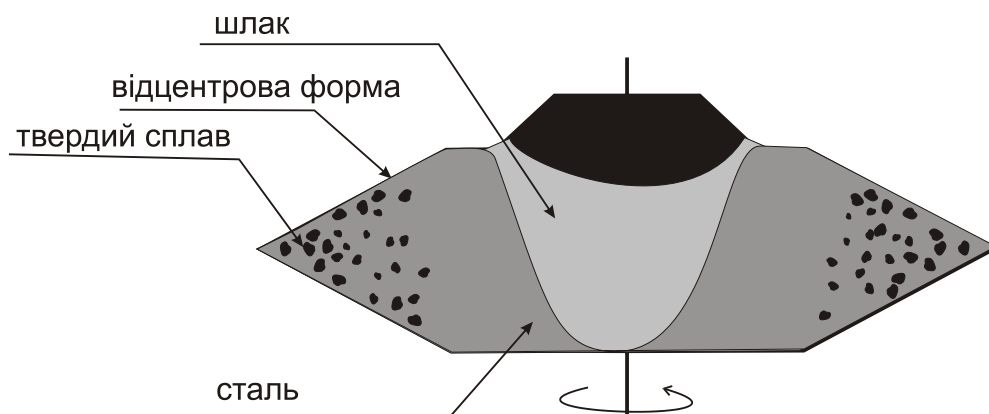


Рисунок 4 – Схема виливка із периферійною композицією «стал-гранульований твердий сплав»

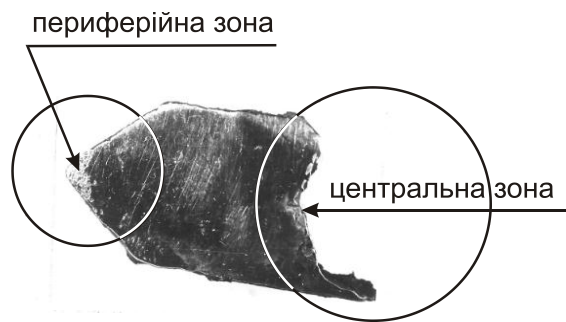


Рисунок 5 – Фрагмент виливка із відображеними відцентровою і доцентровою композиційними зонами

Окрім зменшення щільності розміщення відслідковується і зменшення величини самих гранул, що втратили свої розміри за рахунок термохімічної взаємодії із сталним розплавом. Причому кількість менших за розміром гранул збільшується в міру віддалення від периферії. Серед публікацій, що стосуються вказаного технологічного процесу є такі, в яких пропонується покриття твердосплавних гранул нікелем, або іншими гальванопокриттями, що унеможливорює хімічний контакт твердого сплаву з розплавом сталі [3].

На рис. 5 показано фрагмент виливка із відображеними відцентровою (периферійною) і доцентровою (центральною) композиційними зонами. У роботі [2] представлена аналітична залежність величини доцентрового переміщення твердої частинки R у ньютонівській рідині:

$$R = C_1 e^{\left(m + \sqrt{m^2 + n^2}\right)t} + C_2 e^{-\left(m + \sqrt{m^2 + n^2}\right)t}, \quad (1)$$

де

$$C_1 = \frac{R_0 \left(m + \sqrt{m^2 + n^2}\right)}{2\sqrt{m^2 + n^2}},$$

$$C_2 = \frac{R_0 \left(m + \sqrt{m^2 + n^2} - m\right)}{2\sqrt{m^2 + n^2}},$$

де R_0 – радіус ливарної форми;

$$m = \frac{9\mu}{d^2 \left(\gamma_m + \frac{\gamma_p}{2} \right)},$$

$$n = \sqrt{\omega^2 + \left(\frac{\gamma_m - \gamma_p}{\gamma_m + \frac{\gamma_p}{2}} \right)},$$

де μ – коефіцієнт динамічної в'язкості сталюї рідини Н·см/м²;

d – діаметр гранули, м.

ω – кутова швидкість обертання форми, с⁻¹;

γ_m – питома густина твєрдосплавної гранули, Н/м³;

γ_p – питома густина сталюго розплаву, Н/м³.

Очевидним є те що величина доцентрового переміщення у сталюму розплаві R обмежуватиметься процесом кристалізації виливка, що і слід аналітично підтвердити, враховуючи параметри грануляції.

Постановка проблеми. Задля забезпечення утворення композиційності у периферійній частині виливка, слід установити необхідні параметри та аналітичні співвідношення густини твєрдого сплаву і густини гальванопокриття, та їх розмірів.

Аналітичні залежності, що визначають швидкість фронту і об'єму кристалізації. Враховуючи загальний вектор кристалізації від периферії до центру форми, можна описати динаміку процесу кристалізації через величину об'єму виливка V , який кристалізувався з плином часу:

$$V = V_0 \left(1 - e^{-\frac{\pi}{3} n v^3 t^4} \right), \quad (2)$$

де V_0 – загальний об'єм композиційної (периферійної) частини виливка, м³;

t – час, впродовж котрого кристалізувався об'єм виливка V , с;

v – лінійна швидкість росту кристалів у переохолодженому розплаві, м/с;

$$v = \frac{1.124d}{t_0},$$

де t_0 - час до повної кристалізації виливка, с;

n – швидкість зародження центрів кристалізації в об'ємі, $\text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$;

$$n = \frac{3.1}{t_0 d^3}.$$

Як уже йшлося раніше, для реалізації можливості локалізації гранул у потрібному об'ємі V , потрібно щоб фронт кристалізації випередив швидкість переміщення гранул у момент t , що відповідає часу заповнення гранулами цього об'єму. Для визначення потрібної величини x переміщення фронту кристалізації скористаємося схемою за рисунком 6. Об'єм периферійної зони можна визначити за формулою:

$$V = \frac{\pi h x}{3} (3R_0 - 2x), \quad (3)$$

Отже, знаючи конкретні розміри бурового інструменту R_0 і h (тобто виливка), а також глибину армованої периферійної зони x (формула 3), можна визначити необхідний об'єм кристалізації за час t , який має бути менший чи дорівнювати часу на доцентрове переміщення гранул R (формула 1), яке співпадає з обраною глибиною армування x .

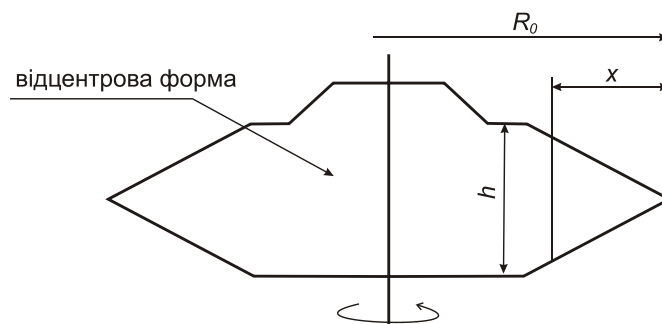


Рисунок 6 – Схема до розрахунку переміщення фронту кристалізації

Визначення потрібної густини гранул покритих нікелем або іншими матеріалами гальванічного покриття. Як уже йшлося у постановці задачі, бажано покрити твердосплавні гранули нікелем, задля захисту останніх від хімічної взаємодії твердого сплаву і сталюого розплаву.

Окрім того крайовий кут змочування у нікеля зі сталлюю рідиною значно нижчий ніж у карбідів, а особливо легких карбідів і нітридів титану. Ще одним аспектом, що виникає при покритті гранул нікелем значної товщини є збільшення середньої густини гранул, що очевидно мусить привести до зменшення швидкості доцентрового їх переміщення у сталлюму розплаві. На рис. 7 показано схему круглої гранули твердого сплаву діаметром d_1 і діаметром , що враховує гальванічне покриття – d_2 .

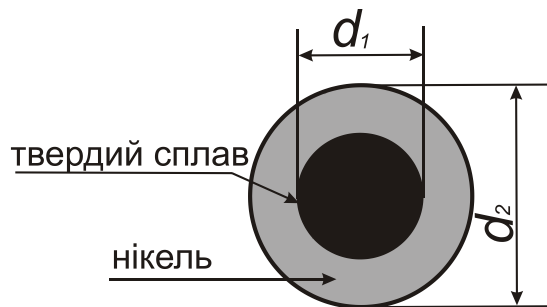


Рисунок 7 – Схема до розрахунку середньої густини круглої гранули

Для визначення середньої питомої густини покритої гранули можна застосувати формулу

$$\gamma_c = \frac{d_1^3}{d_2^3}(\gamma_1 - \gamma_2) + \gamma_2, \quad (4)$$

де γ_1 - питома густина твердого сплаву, Н/м³;

γ_2 - питома густина нікелю, чи іншого гальванопокриття, Н/м³.

Таким чином у формулу 1 замість величини γ_m слід поставити величину γ_c і тим самим досягти меншої величини x (доцентрового переміщення). Реальні гранули твердого сплаву є не круглими, а величина їх грануляції d_1 визначається за їх найменшим розміром, як це показано на рис. 8. Отже насправді об'єм гранули є більшим аніж об'єм кулі, діаметр якої d_1 . Можна вважати, що тіло гранули покрите нікелем, яке має величину грануляції d_2 є геометрично подібним до тіла непокритої гранули. Отже, лінійні параметри покритої гранули d_1 і d_2 є величинами, що гарантують, що об'єм некруглої гранули з цими параметрами є

більшим аніж відповідної за параметрами круглої. З цього маємо, що формула 4 дає гарантоване значення середньої питомої густини гранули з гальванічним покриттям.

Приклад розрахунку середньої питомої густини твердосплавної гранули. Густина сплаву ТВ4 (карбонітриди титану на залізній звязці) становить 6.3 г/см^3 , тобто питома його густина γ_1 дорівнює 630 Н/м^3 . Густина нікелю становить 8.1 г/см^3 , тобто питома його густина γ_2 дорівнює 810 Н/м^3 . Якщо розмір гранули твердого сплаву марки ТВ4 d_1 становить $0,4 \text{ мм}$, а товщина покриття - 30 мкм , тоді маємо покриту гранулу із діаметром $d_2=0,46 \text{ мм}$. Згідно із формулою 4 середня питома густина такої гранули становитиме 700 Н/м^3 , у той сам час як питома густина перегрітого сталю розплаву має значення 680 Н/м^3 , тобто у такому разі можна досягнути межі після якої доцентрове переміщення армуючи гранул не відбуватиметься.

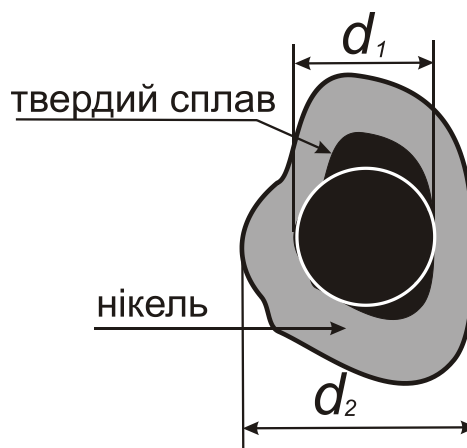


Рисунок 8 – Схема до розрахунку середньої густини некруглої гранули

Аспект розчинення гальванічного покриття. До переваг застосування нікеля, окрім його більшої ніж у сталі питомої густини, як уже згадувалося раніше є і його доволі низький крайовий кут змочування, що позитивно впливає на створення щільного зчеплення гранул із сталюю матрицею. На рис. 9 зображена схема розміщення покритих гранул у сталій матриці. Але низький крайовий кут змочування спонукає до тісного контакту нікелю і рідкої сталі, що вочевидь призводитиме до часткового його розчинення у розплаві.

На рис. 10 показана схема розміщення гранул твердого сплаву нікелеве покриття яких частково розчинилося у сталій матриці створивши у останній леговану нікелем сталю перехідну зону.

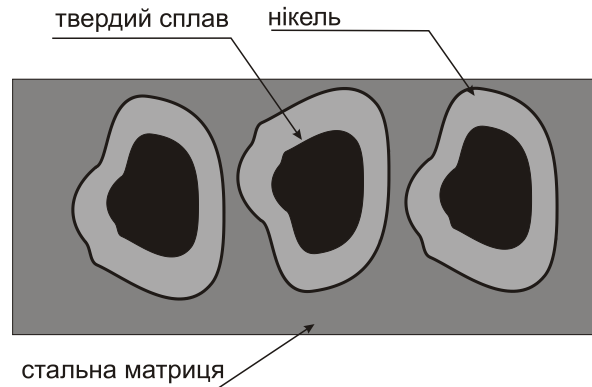


Рисунок 9 – Схема розміщення гранул у сталій матриці без часткового розчинення у ній гальванопокриття

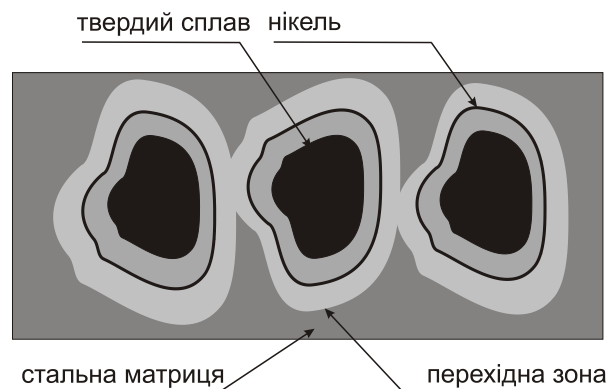


Рисунок 10 – Схема розміщення гранул у сталій матриці з частковим розчиненням у ній гальванопокриття

Очевидно, що розчинення певної кількості гальванопокриття призведе до зменшення середньої густини покритої армуючої гранули, аж до того, що може змінитися її положення внаслідок доцентрового переміщення. Швидкість розчинення у свою чергу залежатиме від швидкості переміщення гранули у розплаві. Важливим є те, щоб не розпочинався процес розчинення власне твердосплавного компоненту, що призведе до його зменшення і значного збільшення крихкості сталюї матриці. На рис. 11 показана схема оголення твердосплавної частини композиту «сталь-твердий сплав», внаслідок абразивного спрацювання

“м’якої” сталюї матриці. Подальша експлуатація характеризуватиметься контактом із пороною власне виступаючих гранул, які надійно закріплені у пластичній матриці.

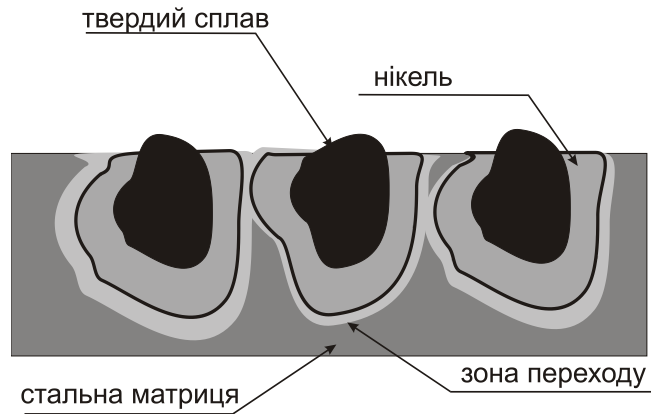


Рисунок 11 – Схема оголення сталюї зв’язки і гальванопокриття у процесі експлуатації із абразивним спрацюванням

Висновки.

1. Електрошлакове тигельне лиття у комплексі із відцентровим литтям уможливує застосування легких твердосплавних гранул для створення композиційної структури «сталю – гранульований твердий сплав» у периферійній частині виливка.

2. Важливим технологічним аспектом цього процесу є застосування гальванопокриття твердосплавних гранул, що надає їм кращого змочування у сталюму розплаві, захищає твердий сплав від часткового його розчинення і збільшує питому густину армуючої гранули створеної на основі твердого сплаву, з питомою густиною меншою ніж у рідкої сталі.

3. До технологічних аспектів слід віднести процес часткового розчинення гальванопокриття у сталюму розплаві, що супроводжуватиметься зменшенням середньої питомої густини гранул, яке може привести до їх доцентрового зміщення на певну величину.

У подальших дослідженнях варто аналітично розглянути процес розчинення гальванопокриття гранул в умовах відцентрового лиття.

Список використаних джерел: 1. Кацов, К. Б. Способ получения армированных отливок : а. с. 685429 СССР (1978) : кл. В 22 D 19/02 / К. Б. Кацов, Ю. Н. Бугай,

М. А. Пятибратов, С. И. Кантор, О. М. Богаченко. 2. Онисько, О. Р. Разработка технологического процесса композиционного электрошлакового армирования дискового породоразрушающего бурового инструмента : Дис. ... канд. техн. наук; 05.16.04 – литейное производство, 05.02.08 – технология машиностроения / О. Р. Онисько; Ивано-Франков. ин-т нефти и газа. – Ивано-Франковск., 1990. – 206 с.
3. Бугай, Ю. Н. Способ центробежного объемного армирования : а. с. 1185733 СССР (1980) : кл. В 22 D 19/02 / Ю. Н. Бугай, К. Б. Кацов, О. Р. Онисько.

Bibliography (transliterated): 1. Kacov, K. B., et al. Sposob polucheniya armirovannyh otливok: a. s. No. 685429 USSR (1978), IPC B 22 D 19/02. Print.
2. Onis'ko, O. R. Razrabotka tehnologicheskogo processa kompozicionnogo jelektroshlakovogo armirovaniya diskovogo porodorazrushajushhego burovogo instrumenta: Dys. ... kand. tehn. nauk. Ivano-Frankivsk, 1990. Print. 3. Bugaj, Ju. N., K. B. Kacov and O. R. Onis'ko. Sposob centrebezhnogo ob#emnogo armirovaniya: a. s. No. 1185733 USSR (1980), IPC B 22 D 19/02. Print.

УДК 621.6.035: 620.1.08

А.Л. СТАНОВСКИЙ, д-р техн. наук,
А.В. ТОРОПЕНКО, канд. техн. наук,
П.С. ШВЕЦ, канд. техн. наук,
В.В. БОНДАРЕНКО, Одесса, Украина

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАСООБМЕННЫХ АППАРАТОВ С ПОМОЩЬЮ ФРАКТАЛЬНЫХ СВЕРТОК КОМПЬЮТЕРНЫХ ТОМОГРАММ

Показано, що проектування процесів і апаратів тепломасообміну потребує методів неруйнівного вимірювання площі обмінної поверхні. Для цього запропоновані згортки зображень, які отримуються в комп'ютерному томографі. Експериментально підтверджена наявність максимуму на залежності інтенсивності тепломасообміну від значень таких згорток, що дозволяє ставити та розв'язувати задачі оптимізації технологічних процесів і конструкцій обмінних апаратів.

Показано, что проектирование процессов и аппаратов тепломассообмена нуждается в методах неразрушающего измерения площади обменной поверхности. Для этого предложены свертки изображений, получаемых в компьютерном томографе. Экспериментально подтверждено наличие максимума на зависимости интенсивности тепломассообмена от значений таких сверток, что позволяет ставить и решать задачи оптимизации параметров технологических процессов и конструкций обменных аппаратов.

It is shown that the design of heat and mass transfer processes and devices in need of non-destructive methods for measuring the area of the exchange surface. For this proposed convolution images obtained in computed tomography. Experimentally confirmed the presence of a maximum on the dependence of the intensity of the heat and mass transfer values of the parcel, enabling to formulate and solve the problem of optimizing process parameters and structures exchanger.

Во многих отраслях машиностроения, химической, нефтегазовой, фармацевтической, пищевой и прочих областях промышленности реализуются процессы, основанные на тепломассообмене на границах между составляющими технологию гетерогенными материалами, компоненты которых могут находиться в любых агрегатных состояниях: твердом, жидком, газообразном и плазменном. Автоматизированное проектирование таких процессов, а также оборудования для их

реализации, невозможно без адекватных моделей явлений, происходящих при тепломассообмене, и новых расчетных методов в САПР.

Процессы, в которых обмен веществом и/или энергией осуществляется через границы между элементами гетерогенных сред, весьма разнообразны. Это, прежде всего, теплообмен, массообмен, адсорбция, абсорбция и многие другие. Научный и практический интерес к ним огромен и не затухает уже столетия, т. к. именно транзит субстанции через границу определяет интенсивность обмена, а значит, все его технико-экономические показатели, включая конструкцию оборудования, создаваемого для проведения этих процессов. Данные процессы относятся к термодинамическим, самопроизвольным и описываются, на первый взгляд, простыми законами.

Так, в качестве основного закона *теплоотдачи* принят закон Ньютона, в соответствии с которым количество тепла dQ , отданное элементом поверхности dF с температурой t_{π} в окружающую среду с температурой t_{cp} за время $d\tau$, прямо пропорционально разности температур $(t_{\pi} - t_{cp})$ и величинам dF и $d\tau$ [1, 2]:

$$dQ = \alpha(t_{\pi} - t_{ж})dFd\tau, \quad (1)$$

а при установившемся состоянии процесса теплоотдачи, когда температура среды и поверхности остаются неизменными:

$$Q = \alpha(t_{\pi} - t_{ж})F\tau \text{ Дж}, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи.

Как сказано выше, величина коэффициента теплоотдачи α , в свою очередь, зависит от большого числа факторов:

- рода жидкости (газ, пар, капельная жидкость);
- характера течения жидкости (вынужденное или свободное);
- формы поверхности и ее линейных размеров;
- состояния поверхности (растворение, осаждение);
- состояния и свойств жидкости (температура, давление, плотность или удельный вес, теплоемкость, теплопроводность, вязкость и т.п.);
- параметров движения (скорость, турбулентность);
- температуры поверхности.

Основным кинетическим уравнением *массообменных* процессов является уравнение массопередачи, которое основано на общих кинетических закономерностях химико-технологических процессов [3].

Скорость процесса [в кг/(м²с)] равна движущей силе Δ , деленной на сопротивление R :

$$dM / dF = \Delta dR \quad (3)$$

где dM – количество вещества, перешедшего из одной фазы в другую в единицу времени; dF поверхность контакта фаз.

При установившемся состоянии процесса массоотдачи, когда температура среды и поверхности остаются неизменными, обозначив $1/R = K$, получим

$$M = K\Delta F \quad (4)$$

В последнем выражении, называемом основным уравнением массоотдачи, величина K характеризует скорость процесса переноса вещества из одной фазы в другую. По аналогии с процессом теплоотдачи коэффициент K называют коэффициентом массоотдачи.

Зависимость коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи от большого числа факторов не позволяет дать общую формулу для его определения и в каждом частном случае необходимо прибегать к опытным исследованиям [4].

Из (2) и (4) непосредственно вытекает, что такие исследования должны опираться на знание площади тепломассобмена F в любом варианте эксперимента, что позволит функционально связать эту площадь с параметрами технологии и конструкций и получить зависимости для обратного расчета площадей взаимодействия (а, значит, и конструкции обменных аппаратов) в САПР [5, 6]. В то же время, как указывалось выше, площадь тепломассобмена F в неподвижных, а тем более, подвижных обменниках, также весьма стохастична даже для аппаратов со строго установленными габаритами.

Поэтому непосредственная оценка текущего значения такой площади позволяет разомкнуть круг «для определения K надо знать F , а

для определения F надо знать K ».

Очевидно, что эксперименты для такой оценки должны быть неразрушающими, позволяющими получить максимальную информацию о пространственном расположении границ тепломассообмена для последующего оценивания их площади, дисперсии и других геометрических характеристик. На сегодняшний день существует способ послойного сканирования внутренних зон различных гетерогенных объектов, – это компьютерная томография, однако, она применяется, в основном, в медицине для просвечивания биологических тканей [7, 8]. Кроме того, результатом томографии является серия изображений, содержащуюся в которых интегральную информацию весьма трудно оценить численно.

Основные физические законы, описывающие тепломассообмен через поверхность, весьма просты и содержат в качестве аргумента первую степень площади этой поверхности. Казалось бы, при прочих равных условиях (интенсивность и время обмена) площадь, как целевая функция оптимизации процессов и аппаратов, должна при проектировании последних монотонно возрастать, – увеличить площадь всегда означает повысить обмен! К сожалению, в реальных условиях всегда находятся обстоятельства, не позволяющие наращивать площадь обмена беспредельно, – это и габариты аппарата, и предельное увеличение количества его обменных элементов (трубок, насадок, тарелок), и предельное измельчение гранулированных и порошкообразных тепломассообменников, и многое другое. Это определяет наличие максимума целевой функции – количества перешедшего через границу энергии и(или) вещества, а значит и поиск таких характеристик процессов и аппаратов, которые доставляют этот максимум.

Парадокс заключается в том, что, назначая в процессе проектирования параметры и размеры, мы не можем даже приблизительно гарантировать их реализацию в реальном объекте. Например, реальная площадь поверхности теплообмена, – величина, лишь весьма приблизительно совпадающая с тем значением этой площади, которое можно получить расчетом, анализируя чертеж теплообменного аппарата. Это связано, во-первых, со сложным, стохастическим рельефом

поверхности (шероховатостью на микроуровне и отклонениями от стандартных размеров – на макроуровне), тепловыми деформациями и пр. Кроме того, критическое сближение поверхностей теплообмена, неизбежное при увеличении количества элементов, может исказить всю физическую модель процесса, удаляя ее от описания «простых» физических законов. Еще сложнее и стохастичнее дело обстоит тогда, когда элементы теплообменника не только не имеют «стандартных» размеров (произвольные куски материала), но еще и перемещаются в пространстве и времени.

В этих условиях приходится рассчитывать на прямое измерение суммарных поверхностей элементов гетерогенных сред на опытных и лабораторных образцах. Создание методов такого измерения, причем неразрушающего, а также выявление параметров (чем их меньше, тем лучше), которые непосредственно измеряются в этом случае, и является основной проблемой при решении данной задачи.

Исходя из изложенного, целью работы было принято повышение эффективности оптимизации параметров технологии и конструкции теплообменных аппаратов в САПР путем разработки методов неразрушающего контроля геометрических характеристик такого обмена. Эти характеристики должны включать компьютерную томографию внутренней рабочей зоны аппарата, в котором протекают обменные процессы, и последующую свертку ее результатов **к одному числу или вектору малой размерности.**

Проектировщики стремятся сделать поверхность теплообмена как можно больше, сохранив при этом габаритные размеры соответствующей оснастки или аппарата. Это заставляет их измельчать отдельные элементы, на поверхности которых протекает процесс, и предельно усложнять их форму. Поэтому прямое измерение поверхности обмена в объеме аппарата не представляется возможным. Более реальным выглядит оценка этой поверхности с помощью томограмм. В классической трактовке под томографией понимается метод рентгенологического исследования, которым можно получить один снимок (рис. 1) или множество подобных снимков, являющихся изображением параллельных секущих слоев малой толщины δ , лежащих на заданных глубинах

исследуемого объекта.

Наибольшее распространение получил метод съёмки, при котором исследуемый объект остается неподвижным, а рентгеновская трубка и кассета с плёнкой согласованно перемещаются в противоположных направлениях. При синхронном движении трубки и кассеты, четким на пленке получается только необходимый слой, так как только его вклад в общую тень остаётся неподвижным относительно плёнки, всё остальное смазывается, почти не мешая проводить анализ полученного изображения [8].

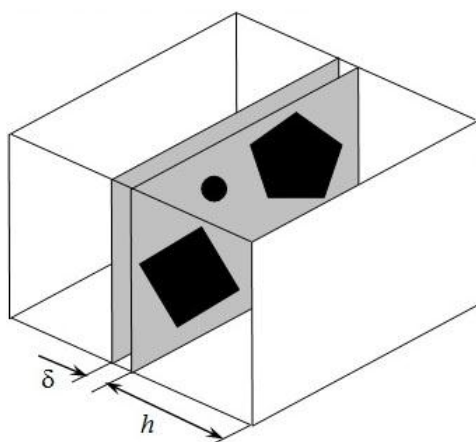


Рисунок 1 – Схема получения изображения внутреннего слоя объекта методом неразрушающей компьютерной томографии

Ранее рентгеновская компьютерная томография использовалась, в основном, в медицинской диагностике, в настоящей работе ее применили для объекта неживой природы. В частности, эксперименты производили с таким объектом поверхностного массообмена (адгезии) как синтетический гранит (синтегран, состоящий из гравия, песка и наполняющей смолы). Такая затвердевающая смесь движется по каналам, заполняет оснастку, постоянно перемешиваясь. При этом поверхностные явления протекают не только в пространстве, но и во времени.

С другой стороны, от интенсивности адгезии зависит не только прочность этого конструкционного материала, но и многие его физические свойства и потребительские характеристики.

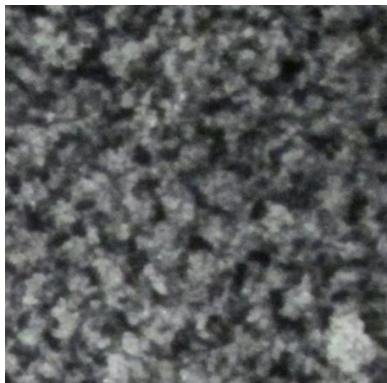


Рисунок 2 – Компьютерная томограмма фрагмента детали из синтетического графита, полученная на томографе *Siemens R2000* при напряжении 125кВ и токе 20мА; $\times 1$

Томографические изображения технических гетерогенных материалов типа синтетического графита получились сложными, выполненными в оттенках серого (256 градаций яркости от 0 – черный до 255 – белый) и содержащими контрастные переходы и мелкие детали (рис. 2). Все это позволяет отнести их к фотореалистическим, требующим значительной мобилизации всех компьютерных ресурсов при их свертке.

Для изображений подобного типа можно выделить три основных вида фрактальных сверток, обладающих различными свойствами и подходящих для решения различных задач проектирования (табл. 1).

Таблица 1 – Виды сверток и их характеристики

№ пп	Вид свертки	Результат свертки	Область применения	Возможность обратного преобразования
1	С помощью расчета хаусдорфовой размерности	Число	Неподвижное изображение	Нет
2	С помощью принципа сжимающих отображений	Массив чисел		Есть
3	С помощью параболического преобразования	Число	Подвижное изображение	Нет

Так, свертка с помощью расчета хаусдорфской размерности представляет собой одно число, удобное для экспресс-анализа соответствующих процесса и аппарата, свертка с помощью принципа сжимающих отображений представляет собой значительный массив чисел, который позволяет, однако, довольно быстро восстановить исходное изображение. Это удобно для хранения и передачи соответствующих изображений, а свертка с помощью параболического преобразования позволяет сводить к одному числу пространственные изображения.

Свертки первого и третьего видов начинаются с того, что у исходного изображения (рис. 3, а) осуществляется выделение границ (рис. 3, б) между элементами гетерогенной смеси [9, 10].

Для свертки второго вида выделение границ не производится, вместо этого кадры томограммы подвергают бинаризации – сведению всего многообразия серых полутонов томограммы к двум: черному и белому. Информационные технологии выполнения трех видов сверток томографических изображений выглядят следующим образом.

1. Свертка с помощью расчета хаусдорфской размерности [11, 12].

Как правило, определение корреляционной размерности и энтропии осуществляется для мультифракталов – неоднородных фрактальных объектов, которые имеют не только геометрические, но и статистические характеристики. Другими словами неоднородные фракталы имеют неравномерное распределение точек множества или разную плотность «заселенности» множества.

Поэтому при исследовании мультифракталов говорят об обобщенной фрактальной размерности [11, 13], которая может быть представлена фрактальными (хаусдорфовскими) размерностями.

Как отмечено в работе [13], величина функции мультифрактального спектра фактически равна хаусдорфовой размерности (D) некоторого однородного фрактального подмножества из исходного множества, которое дает доминирующий вклад в статистические характеристики множества. Поэтому в первом приближении можно считать, что D является фрактальной размерностью относительно однородных фракталов в мультифрактальном множестве.

Хаусдорфівська свертка починається (рис. 3 в) з покриття зображення невеликими квадратами зі стороною n . Далі підраховується кількість таких квадратиків, в які потрапляють фрагменти виділених границь [14, 15].

2. Свертка з допомогою принципу сжимаючих зображень.

Як відомо, фотореалістичні зображення не є в точності (повністю) самоподібними, т. є. не містять такого самоподібності, яке спостерігається в фракталах [16, 17]. Тим не менше, в будь-якому зображенні є області, які подібні при різному масштабі.

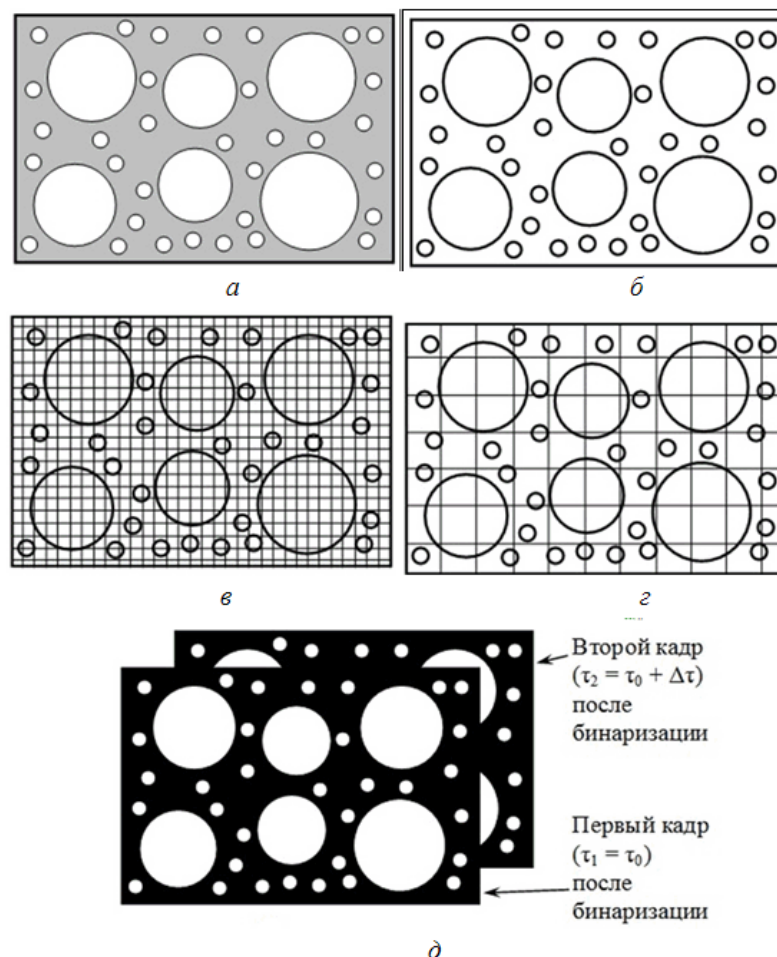


Рисунок 3 – Схеми етапів свертки поверхності тепломасообміну:
 а – томограмма (сечение); б – виділенні границі в сеченні; в – к розрахунку хаусдорфівської розмірності границі в сеченні; г – к свертці з допомогою принципу сжимаючих зображень; д – два послідовних кадри після бінаризації, готові к свертці з допомогою параболічного перетворення

Отличие такого локального (ограниченного, кусочного) самоподобия от самоподобия, присутствующего во фракталах, состоит в том, что изображение формируется из преобразованных копий *частей* самого себя, а не *всего* самого себя. Эти преобразованные части не образуют точную копию оригинального изображения, и, следовательно, допускается некоторая ошибка в подобном представлении изображения. Это означает, что изображение, которое кодируется как множество преобразований, применяемых к определённым частям изображения, будет не идентичной копией оригинального изображения, а его аппроксимацией [18].

Фрактальная свертка с помощью принципа сжимающих отображений начинается с разбиения изображения на фрагменты – блоки (рис. 3 з). Основная идея блочного разбиения изображения заключается в том, что изображение μ_{origin} разделяется на N неперекрывающихся ранговых блоков $R_i, i \in \{1 \dots N\}$, которые покрывают всё изображение, т. е. содержат каждый пиксель изображения.

Затем формируется множество D , состоящее из больших по площади, чем ранговые, доменных блоков $D_j, j \in \{1 \dots M\}$ того же изображения μ_{origin} , которые могут перекрываться и не содержать каждый пиксель изображения.

Далее производится подбор каждому ранговому блоку некоторого доменного, наиболее близкого ему по заданному критерию [19-21].

3. Свертка в результат параболического преобразования.

Эта свертка осуществляется не только в пространстве изображения, но и во времени, т. е. несет в себе признаки изменения этого изображения или видеопотока (оцифрованного видеофильма) [22–24]. Параболическое преобразование заключается в попиксельной обработке двух кадров потока в соответствии с конечно-разностным приближением параболического закона распределения фазовой переменной: температуры, концентрации и т.п.

В результате параболического преобразования на границах подвижных участков изображения с постоянной на каждом участке, но разной между участками яркостью, создается белая линия толщиной в один пиксель на общем черном фоне полученного кадра. Из двух последовательных фотореалистических изображений, подобных

изображенному на рис. 2, результат такого преобразования создает картину, напоминающую звездное небо: хаотически расположенные белые точки на черном фоне. Простое суммирование количества этих точек в итоговом изображении превращает результат параболического преобразования в число.

Наличие сверток изображений и видеопотоков *в виде одного числа* позволяет получить экспериментальные зависимости технологических и конструктивных параметров от этого числа.

Рассмотрим, в качестве второго примера массообменный абсорбционный аппарат – насадочный скруббер, работающий в системе газоочистной установки, удаляющей из выбрасываемых в атмосферу газов такие очень токсичные вещества, как фтористый водород, диоксид серы и оксид углерода. В процессе очистки эти газы абсорбируются пленками жидкости, содержащими растворенные в ней вещества (фтористый натрий, кальцинированная сода, бикарбонат натрия, сульфат натрия), и химически нейтрализуются. В насадочных аппаратах жидкость распределяется по поверхности насадочных элементов (например, небольших полых цилиндров), образуя на них жидкую пленку. Газ движется между элементами в каналах сложной формы, образованных насадкой и стекающей по ней жидкостью [25, 26].

Технические характеристики используемых скрубберов приведены в табл. 2

Таблица 2 – Технические характеристики насадочных скрубберов

Типоразмер скруббера	Диаметр аппарата, мм	Производительность, м ³ /ч	Масса, кг
СДК 2,4-2-01	2400	64000-120000	6284
СДК 1,6-2-01	1600	32000 – 60000	3535
СДК 1,2-2-01	1200	16000-30000	2035

Как видно из таблицы, производительность скруббера в значительной мере зависит от его габаритов, так как при увеличении внутреннего объема аппарата в нем можно разместить большее количество насадки – множества мелких предметов, как правило, сложной формы, что

неизбежно приводит к увеличению их суммарной поверхности, а значит, и интенсивности поверхностного массообменного процесса.

Такого увеличения суммарной площади поверхности насадки можно добиться и по-другому: для этого достаточно, не изменяя объема аппарата, уменьшить габаритный размер применяемых насадок. Уравнение, связывающее площадь этой поверхности с интенсивностью процесса абсорбции выглядит так [27]:

$$M = F \cdot K_x \cdot \Delta X_{cp} \quad (5)$$

где M – количество вещества, переходящее из газовой смеси в жидкую фазу в единицу времени, или нагрузка аппарата, кг/с;

K_x – коэффициенты массопередачи по фазам, кг/(м²с);

ΔX_{cp} – средняя движущая сила процесса абсорбции, кг/кг.

Как следует из (5), при увеличении суммарной площади насадок F интенсивность процесса абсорбции должна линейно и монотонно возрастать (1, рис. 4). Практически это не так, и увеличение суммарной площади поверхности насадки за счет ее измельчения не приводит к линейному возрастанию интенсивности.



Рисунок 4 – Теоретическая (1) и реальная (2) зависимости интенсивности абсорбции от площади поверхности насадки

Как показывает лабораторный эксперимент, измельчение насадки приводит к тому, что кривая зависимости интенсивности абсорбции от

площади поверхности насадки проходит через максимум и при дальнейшем измельчении начинает убывать (2, рис. 4). Это связано со снижением проницаемости пористой среды внутри корпуса абсорбера для жидкости и газа, а также с усилением взаимовлияния на процесс абсорбции на поверхностях близко расположенных насадок.

В эксперименте интенсивность процесса абсорбции определяли непосредственно на аппарате, удельную площадь поверхности насадки $F_{уд}$ – расчетом по формуле $F_{уд} = 4\pi/R$, где R – характерный размер элемента насадки, а сверткой томографии сечения насадки являлась хаусдорфовская размерность. Как сказано выше, экспериментально определить площадь рабочей поверхности насадки очень сложно, а хаусдорфовская размерность ее сечения – параметр вполне доступный. Именно по нему и вели оптимизацию конструкции абсорбера, что дало возможность повысить его производительность на 17 % без увеличения исходных габаритов.

Исследования процессов тепломассобмена на границах между элементами гетерогенных сред показали, что такой распространенный параметр как площадь обмена не всегда может быть использован в качестве оптимизирующего аргумента в процессе проектирования тепломассообменного оборудования. Вместо этого параметра предложены числовые характеристики, представляющие собой свертки изображений сечений активной зоны тепломассобмена.

Предложен метод получения сечений гетерогенных сред с помощью рентгеновского компьютерного томографа, получены реальные томограммы сечений синтетического гранита, при формировании которого происходит интенсивный поверхностный массообмен.

Список использованных источников: 1. prEN ISO 13790. Thermal performance of buildings – Calculation of energy use for space heating / Sweden, 2002. – P. 10-31. 2. Valancius K. Transient heat conduction process in the multilayer wall under the influence of solar radiation / K. Valancius, A. Skrinska. – Improving human potential program. – Almeria, Spain: PSA, 2002. – P. 179–185. 3. Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии / Г.Д. Кавецкий, В.П. Касьяненко. – М.: КолосС, 2008. – 591 с. 4. Реальная структура твердого тела / М.: МГУ, 2006. – Режим доступа: <<http://www.fnm.msu.ru/documents/15real15.pdf>>. – 12.07.2014. 5. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии / Ю.И. Дытнерский. – М.: Химия, 1995. –

- Т. 1, 2. **6.** Кострова Г.В. Обладнання нафтогазової та хімічної галузі / Г.В. Кострова, О.С. Савельєва, О.Л. Становський. – Одеса: ОНПУ, 2011. – 145 с. **7.** Левин Г.Г. Оптическая томография / Г.Г. Левин, Г.Н. Вишняков. – М.: Радио и связь, 1989. – 224 с. **8.** Намтерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии / Ф. Намтерер. – М.: Мир, 1990. – 288 с. **9.** Canny J.A Computational Approach to Edge Detection / J.A. Canny. – Transactions on pattern analysis and machine intelligence, IEEE. – V. PAMI-8, 1986. – №. 6. – P. 679–698. **10.** Aizenberg I. Image Processing Using Cellular Neural Networks Based on Multi-Valued and Universal Binary Neurons / I. Aizenberg, C. Butakoff // Journal of VLSI Signal Processing Systems for Signal, Image and Video Technology. – 2002. – Vol. 32. – P. 169–188. **11.** Федер Е. Фракталы / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 254 с. **12.** Номоев А.В. Фрактальная размерность границ зерен керамики с нанодисперсными добавками / А.В. Номоев, Л.С. Викулина // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, Вып. 12. – С. 139–142. **13.** Божокин С.В. Фракталы и мультифракталы / С.В. Божокин, Д.А. Паришин. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 128 с. **14.** Измеров М.А. Методы определения фрактальной размерности инженерных поверхностей / М.А. Измеров // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2006. – № 3(11). – С. 10–19. **15.** Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с. **16.** Lauwerier H.A. Fractals (Mathematics, Programming and Applications) / H.A. Lauwerier, J.A. Kaandorp // Report CS-R8762 – Centre for Mathematics and Computer Science, Amsterdam, The Netherlands, 1987. – P. 1–33. **17.** Lin H. Fast pyramidal search for perceptually based fractal image compression / H. Lin, A.N. Venetsanopoulos – Department of Electrical and Computer Engineering, Toronto University, Canada, 1996. – P. 1–4. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/icip.1996.559461>. **18.** Fisher Y. Fractal image compression / Y. Fisher – SIGGRAPH'92 Course Notes: From Folk Art to Hyperreality, P. Prusinkiewicz, ed., 1992. – P. 1 – 21. **19.** Востров Г.Н. Принцип сжимающих отображений и его применение для фрактального сжатия изображений / Г.Н. Востров, Т.А. Абу Айаш – Труды Одесского политехнического университета. – 2001. – Вып. 2 (14). – С. 96–99. **20.** Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах / Р.М. Кроновер. – М.: Постмаркет, 2000. – 198 с. **21.** Колмогоров А.Н. Элементы теории функций и функционального анализа / А.Н. Колмогоров, С.В. Фомин. – М.: Наука, 1989. – 267 с. **22.** Востров Г.М. До питання про фрактальне кодування відеопотоків / Г.М. Востров, Т.А. Абу Айаш, П.О. Становський. – Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. – 2005. – Вип. 17. – С. 41–48. **23.** Тонконогий В.М. Видеообработка изображений в системе автоматического измерения дефектности износостойких покрытий на режущем инструменте / В.М. Тонконогий, П.А. Становский // Труды ОНПУ. – 2005. – Вып. 1 (23). – С. 112–115. **24.** Становський П.О. Розробка методу фрактального кодування-декодування відеопотоків / П.О. Становський, Є.В. Малахов, О.О. Арсірій // Труды ОНПУ. – 2007. – Вып. 2 (28). – С. 113–116. **25.** Лантев А.Г. Основы расчета и модернизация теплообменных установок в нефтехимии / А.Г. Лантев, М.И.

Фарахов, Н.Г. Минеев. – Казань: КГЭУ, 2010. – 574 с. 26. Лантев А.Г. Методы интенсификации и моделирование тепломассообменных процессов / А.Г. Лантев, Н.А. Николаев, М.М. Башаров. – М.: Теплотехник, 2011. – 335 с. 27. Скобло А.И. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии / А.И. Скобло, Ю.К. Молоканов А.И. Владимиров и др. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2000. – 677 с.

Bibliography (transliterated): 1. prEN ISO 13790. Thermal performance of buildings – Calculation of energy use for space heating / Sweden, 2002. – R. 10 – 31. 2. Valancius K. Transient heat conduction process in the multilayer wall under the influence of solar radiation / K. Valancius, A. Skrinska. – Improving human potential program. – Almeria, Spain: PSA, 2002. – R. 179–185. 3. Kaveckij G.D. Processy i apparaty pishhevoj tehnologii / G.D. Kaveckij, V.P. Kas'janenko. – М.: KolosS, 2008. – 591 s. 4. Real'naja struktura tverdogo tela / М.: MGU, 2006. – Rezhim dostupa: <<http://www.fnm.msu.ru/documents/15real15.pdf>>. – 12.07.2014. 5. Dytnerskij Ju.I. Processy i apparaty himicheskoy tehnologii / Ju.I. Dytnerskij. – М.: Himija, 1995. – Т. 1, 2. 6. Kostrova G.V. Obladnannja naftogazovoї ta himichnoї galuzi / G.V. Kostrova, O.S. Savel'eva, O.L. Stanov's'kij. – Odesa: ONPU, 2011. – 145 s. 7. Levin G.G. Opticheskaja tomografija / G.G. Levin, G.N. Vishnjakov. – М.: Radio i svjaz', 1989. – 224 s. 8. Natterer F. Matematicheskie aspekty komp'juternoj tomografii / F. Natterer. – М.: Mir, 1990. – 288 s. 9. Canny J.A Computational Approach to Edge Detection / J.A. Canny. – Transactions on pattern analysis and machine intelligence, IEEE. – V. PAMI-8, 1986. – №. 6. – R. 679–698. 10. Aizenberg I. Image Processing Using Cellular Neural Networks Based on Multi-Valued and Universal Binary Neurons / I. Aizenberg, C. Butakoff // Journal of VLSI Signal Processing Systems for Signal, Image and Video Technology. – 2002. – Vol. 32. – R. 169–188. 11. Feder E. Fraktaly / E. Feder. – М.: Mir, 1991. – 254 s. 12. Nomoev A.V. Fraktal'naja razmernost' granic zeren keramiki s nanodispersnymi dobavkami / A.V. Nomoev, L.S. Vikulina // Zhurnal tehničeskoy fiziki. – 2012. – Т. 82, Vyp. 12. – S. 139–142. 13. Bozhokin S.V. Fraktaly i mul'tifraktaly / S.V. Bozhokin, D.A. Parshin. – Izhevsk: NIC «Reguljarnaja i haoticheskaja dinamika», 2001. – 128 s. 14. Izmerov M.A. Metody opredelenija fraktal'noj razmernosti inženernyh poverhnostej / M.A. Izmerov // Vestnik Brjanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2006. – № 3(11). – S. 10–19. 15. Mandel'brot B. Fraktal'naja geometrija prirody / B. Mandel'brot. – М.: Institut komp'juternyh issledovanij, 2002. – 656 s. 16. Lauwerier H.A. Fractals (Mathematics, Programming and Applications) / H.A. Lauwerier, J.A. Kaandorp // Report CS-R8762 – Centre for Mathematics and Computer Science, Amsterdam, The Netherlands, 1987. – P. 1–33. 17. Lin H. Fast pyramidal search for perceptually based fractal image compression / H. Lin, A.N. Venetsanopoulos – Department of Electrical and Computer Engineering, Toronto University, Canada, 1996. – P. 1–4. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/icip.1996.559461>. 18. Fisher Y. Fractal image compression / Y. Fisher – SIGGRAPH'92 Course Notes: From Folk Art to Hyperreality, P. Prusinkiewicz, ed., 1992. – P. 1 – 21. 19. Vostrov G.N. Princip szhimajushhij otobrazhenij i ego primenenie dlja fraktal'nogo szhatija izobrazhenij / G.N.

Vostrov, T.A. Abu Ajash – Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta. – 2001. – Vyp. 2 (14). – S. 96–99. 20. Kronover P.M. Fraktaly i haos v dinamicheskikh sistemah / P.M. Kronover. – M.: Postmarket, 2000. – 198 s. 21. Kolmogorov A.N. Jelementy teorii funkcij i funkcional'nogo analiza / A.N. Kolmogorov, S.V. Fomin. – M.: Nauka, 1989. – 267 s. 22. Vostrov G.M. Do pitannja pro fraktal'ne koduvannja videopotokiv / G.M. Vostrov, T.A. Abu Ajash, P.O. Stanovs'kij. – Naukovi notatki. Mizhvuzivs'kij zbirnik. – 2005. – Vip. 17. – S. 41–48. 23. Tonkonogij V.M. Videoobrabotka izobrazhenij v sisteme avtomaticheskogo izmerenija defektnosti iznosostojkih pokrytij na rezhushhem instrumente / V.M. Tonkonogij, P.A. Stanovskij // Trudy ONPU. – 2005. – Vyp. 1 (23). – S. 112–115. 24. Stanovs'kij P.O. Rozrobka metodu fraktal'nogo koduvannja-dekoduvannja videopotokiv / P.O. Stanovs'kij, Є.V. Malahov, O.O. Arsirij // Trudy ONPU. – 2007. – Vyp. 2 (28). – S. 113–116. 25. Laptev A.G. Osnovy rascheta i modernizacija teplomassoobmennyh ustanovok v neftehimii / A.G. Laptev, M.I. Farahov, N.G. Mineev. – Kazan': KGJeU, 2010. – 574 s. 26. Laptev A.G. Metody intensivifikacii i modelirovanie teplomassoobmennyh processov / A.G. Laptev, N.A. Nikolaev, M.M. Basharov. – M.: Teplotehnik, 2011. – 335 s. 27. Skoblo A.I. Processy i apparaty neftegazopererabotki i neftehimii / A.I. Skoblo, Ju.K. Molokanov A.I. Vladimirov i dr. – M.: Nedra-Biznescentr, 2000. – 677 s.

УДК 621.923

В.А. ФЕДОРОВИЧ, д-р техн. наук,
И.Н. ПЫЖОВ, д-р техн. наук, Харьков, Украина

3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Наведені результати досліджень по 3D моделюванню напружено-деформованого стану алмазоносного шару при спіканні алмазних шліфувальних кругів. Встановлено вплив основних факторів на виникаючі внутрішні напруження в зернах. За допомогою багатфакторного експерименту отримана математична модель, яка відображає вплив цих факторів на напружено-деформований стан системи «алмазне зерно – металофаза – зв'язка».

Приведены результаты исследований по 3D моделированию напряженно-деформированного состояния алмазоносного слоя при спекании алмазных шлифовальных кругов. Установлено влияние основных факторов на возникающие внутренние напряжения в зернах. С помощью многофакторного эксперимента получена математическая модель, которая отражает влияние этих факторов на напряженно-деформированное состояние системы «алмазное зерно - металлофаза - связка».

The results of investigations on 3D simulation of the diamond-bearing layer deflected mode when sintering diamond grinding wheels are given. The influence of the main factors in the internal stresses arising in the grains are revealed. Using multifactorial experiment the mathematical model, which reflects the impact of these factors on the deflected mode of the «diamond grain - metal phase - bond» system is obtained.

Постановка проблемы. Эффективность эксплуатации алмазных кругов во многом определяется такими факторами как качество изготовления алмазоносного слоя и его оптимальная характеристика. Процесс изготовления алмазных кругов на различных связках характеризуется достаточно высокой трудоемкостью. Необходимо достичь повышения надежности и качества при изготовлении алмазно-абразивного инструмента, без чего невозможно его эффективное применение в производстве. Это в первую очередь относится к процессу спекания алмазоносного слоя. В настоящее время отсутствуют научно обоснованные

рекомендации по выбору рациональных сочетаний прочности, марки зерна, зернистости, концентрации с физико - механическими свойствами связок кругов. Следование существующим в литературе рекомендациям по применению в шлифовальных кругах на различных связках тех или иных сочетаний марок связок и алмазных зерен, их концентрации носят общий характер, что приводит к повреждению зерен в процессе спекания и в дальнейшем низкой производительности процесса абразивной обработки [1-2].

Одним из путей решения проблемы повышения эффективности изготовления алмазно-абразивного инструмента является использование методологии 3D моделирования этого процесса [3-9]. Методология основана на расчетах методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния (НДС) зоны спекания алмазно-абразивных инструментов и зоны шлифования. При этом без длительных, трудоемких и дорогостоящих экспериментальных исследований расчетным путем можно определить рациональный состав алмазоносного слоя круга (физико-механические свойства связка круга, зернистость, концентрация алмазных зерен и др.), а при необходимости и рациональную конструкцию круга, например, для сверхскоростного шлифования и др.

Решение поставленных задач базируется на использовании пакетов программ COSMOS, ANSYS, NOSTRAN, «Third Wave AdvantEdge», «LS-DYNA», предназначенных для исследовательских расчетов методом конечных элементов.

В развитие выполненных ранее нами исследований [10-17] в данной работе было исследовано влияние количественного состава металлофазы в алмазном зерне и температуры на НДС алмазоносного слоя при спекании алмазных кругов.

Анализ последних исследований и публикаций. Установлено, что вопрос повышения эффективности алмазного шлифования остается актуальным и современные методы математического моделирования могут привести значительные результаты. Известно, что в процессе эксплуатации алмазно-абразивного инструмента коэффициент эффективного использования алмазных зерен не превышает 5-10%. Остальные зерна разрушаются ещё на этапе изготовления либо выпадают в

ходе эксплуатации круга. Поэтому на начальном этапе изготовления алмазного круга на различных связках важно определить оптимальные технологические параметры его изготовления, а именно давление, температуру и время спекания при которых не будет нарушена целостность алмазных зерен. На следующем этапе эксплуатации спеченных кругов, необходимо рассмотреть и изучить факторы, повышающие эффективность процесса алмазного шлифования, что в дальнейшем позволит достичь высокого коэффициента использования потенциала алмазных зерен.

Цель исследования. Целью данной работы является определение (путем использования процесса 3D моделирования НДС зоны спекания алмазоносного слоя) оптимального сочетания прочностных свойств алмазных зерен и связки, при которых обеспечивается сохранение целостности алмазных зерен в процессе изготовления алмазного круга.

Основные материалы исследования. Для изучения процесса спекания алмазоносного слоя шлифовальных кругов при помощи 3D-моделирования рассматривалась система «связка – зерно – металлофаза» и учитывалось влияние компонентов этой системы на ее НДС в процессе спекания. Было изучено влияние свойств металлофазы (металла-катализатора) и её процентного содержания на изменение внутренних эквивалентных напряжений в алмазных зернах различных марок, после чего полученные результаты сравнивались.

Влияние количественного состава металлофазы в зерне на НДС зоны спекания. В модели зерно и связка рассматривались упругими сплошными телами. Алмазные зерна моделировались в виде октаэдров (рис. 1) с размерами в зависимости от рассматриваемой зернистости от 50х30х30 до 500х300х300 мкм. Наличие металла-катализатора в алмазных зернах моделировалось произвольно ориентированными пластинами, объемное содержание которых составляло 5-10% [18]. Рассматривалось наличие одной, двух и трех включений металлофазы, расположенных у граней октаэдра. Связка круга представлялась в виде кубического фрагмента с размерами от 500х500х500 до 3000х3000х3000 мкм в зависимости от размера и концентрации зерен. Модель нагружалась статической одноосной равномерно распределенной нагрузкой, в виде

приложенных значений давления и температуры. Была создана расчетная 3D-модель, а расчеты НДС в ней проводились в приложении CosmosWorks.

Поскольку предел прочности алмаза на растяжение ниже чем на сжатие, то в качестве критерия разрушения принимались полученные расчетным путем значения максимальных растягивающих напряжений, которые сравнивались с пределом прочности для алмазов различных марок и зернистостей [5-6].

Алмазные зерна моделировались в виде восьмиугольников, а в зависимости от зернистости их размеры варьировались. В исходной модели рассматривалось алмазное зерно марки АС6 (зернистостью 160/125).

Для исследования влияния количественного состава металлофазы в зерне были разработаны модели с различным процентным содержанием металлофазы. На рисунке 1 показана расчетная модель, содержащая одно, два и три включения металла-катализатора.

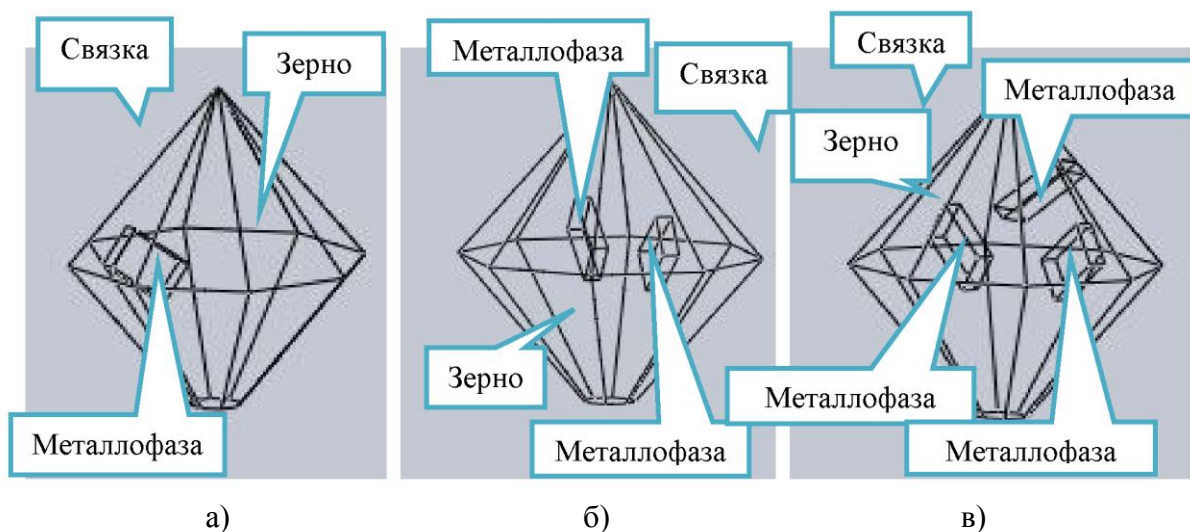


Рисунок 1 – 3D модель алмазного зерна, содержащего одно (а), два (б) и три (в) включения металла-катализатора

После построения расчетной 3D - модели была сгенерирована сетка конечных элементов, причем сетка сгущалась в месте присутствия алмазного зерна и металла-катализатора. Из эпюр напряжений,

представленных на рисунке 2, видно, что наибольшие напряжения при нагреве 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 рост полей напряжений. При расположении всех трех включений металлофазы в верхней части зерна наблюдается наложение напряжений, что может привести к разрушению значительного объема алмазного зерна.

металлической фаз, что вызывает опережающее расширение включений и появление внутренних напряжений в зерне.

Для исследования процесса спекания был использован метод математического планирования многофакторного эксперимента. Был реализован D - оптимальный план типа В4. В качестве факторов принимались: количество металлофазы, КТР металлофазы, модуль упругости связки и температура. Значения уровней факторов, указаны в таблице.

Таблица – Уровни факторов плана В 4

Уровни факторов	Факторы							
	Количество металлофазы		КТР металлофазы		Модуль упругости связки,		Температура,	
	Натуральное значение, %	Кодированное значение X_1	Натуральное значение, 1/К	Кодированное значение, X2	Натуральное значение, Н/м ²	Кодированное значение X3	Натуральное значение, °С	Кодированное значение X4
Верхний уровень	3	+1	3,16e-05	+1	2,04e+011	+1	800	+1
Основной уровень	2	0	2,24e-05	0	1,53e+011	0	600	0
Нижний уровень	1	-1	1,32e05	-1	1,02e+011	-1	400	-1

На рис. 3 приведена визуализация результатов расчета по проведенным 24-м модельным экспериментам. Она дает возможность в полной мере отобразить напряжения, возникающие в зоне спекания при варьировании четырех приведенных факторов одновременно. Для наглядности отображения напряжений, возникающих в окрестности металлофазы, связка была скрыта.

Обработка результатов планируемого эксперимента позволила получить уточненную математическую модель, описывающую процесс спекания алмазных шлифовальных кругов в представленном диапазоне варьирования независимых факторов:

$$Y = 3,71 + 0,58X_1 + 0,18X_2 + 0,03X_3 + 0,31X_4 - 0,03X_1X_2 + 0,007X_1X_3 + 0,39X_1X_4 + 0,006X_2X_3 - 0,03X_2X_4 + 0,02X_3X_4 + 0,32X_1^2 + 0,28X_2^2 + 0,13X_3^2 + 0,12X_4^2 \quad (1)$$

Влияние характеристик шлифовального круга на целостность алмазных зерен в процессе спекания. На рисунке 4 представлены зависимости напряжений, возникающие в системе «зерно–связка–

металлофаза» от количества включений металлофазы при изменении модуля упругости связки.

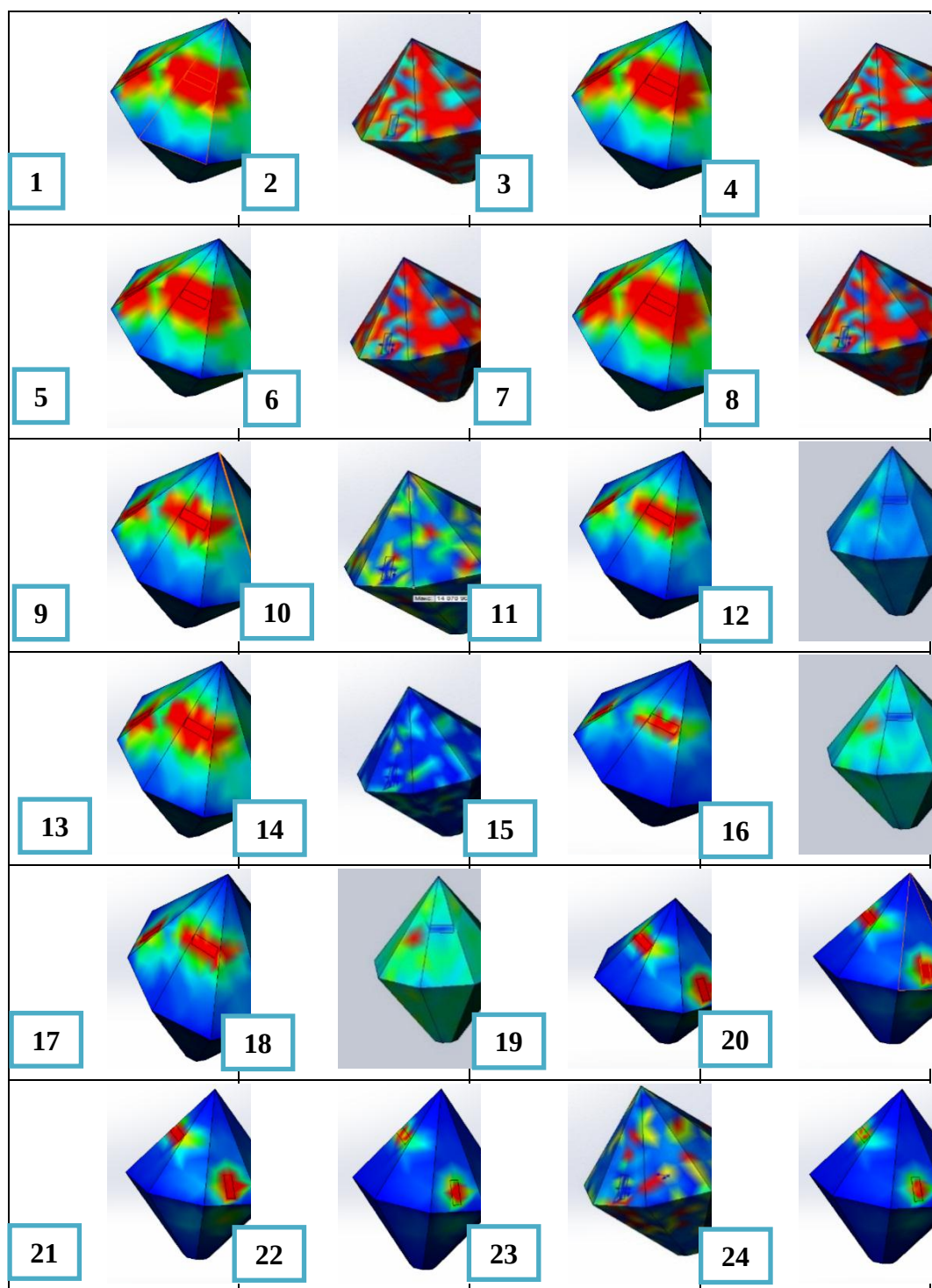


Рисунок 3 – Визуализация результатов моделирования по влиянию факторов на НДС зоны спекания алмазосодержащего слоя

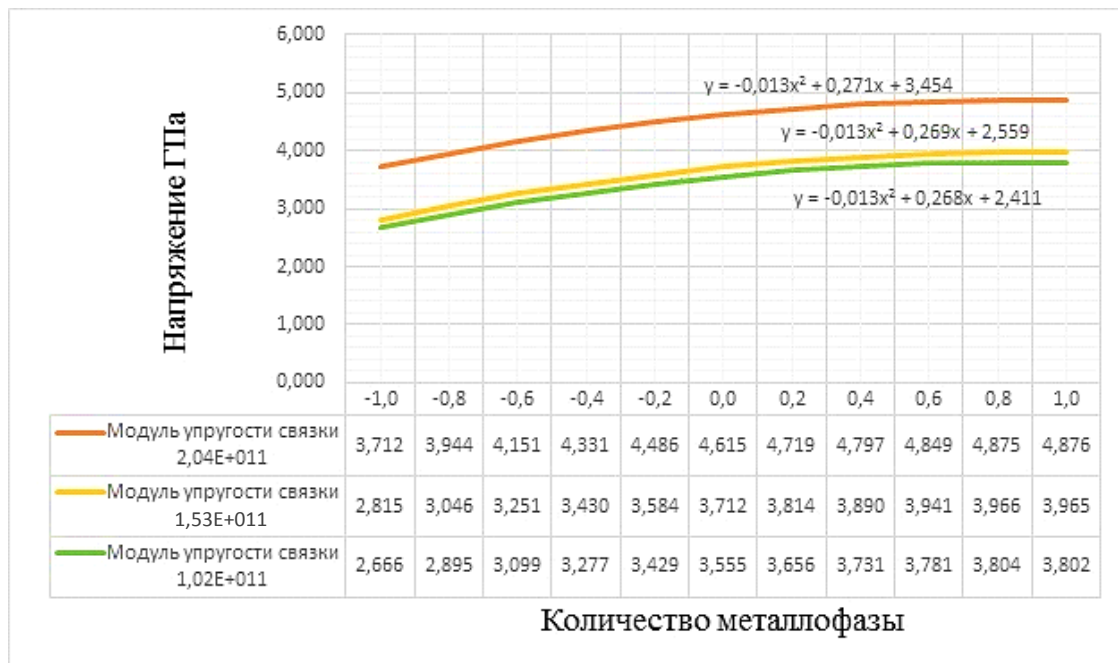


Рисунок 4 – Зависимость напряжений в системе от количества металлофазы при изменении модуля упругости связи

На рис. 5 приведены фрагменты построенных двух - и трехмерных зависимостей:

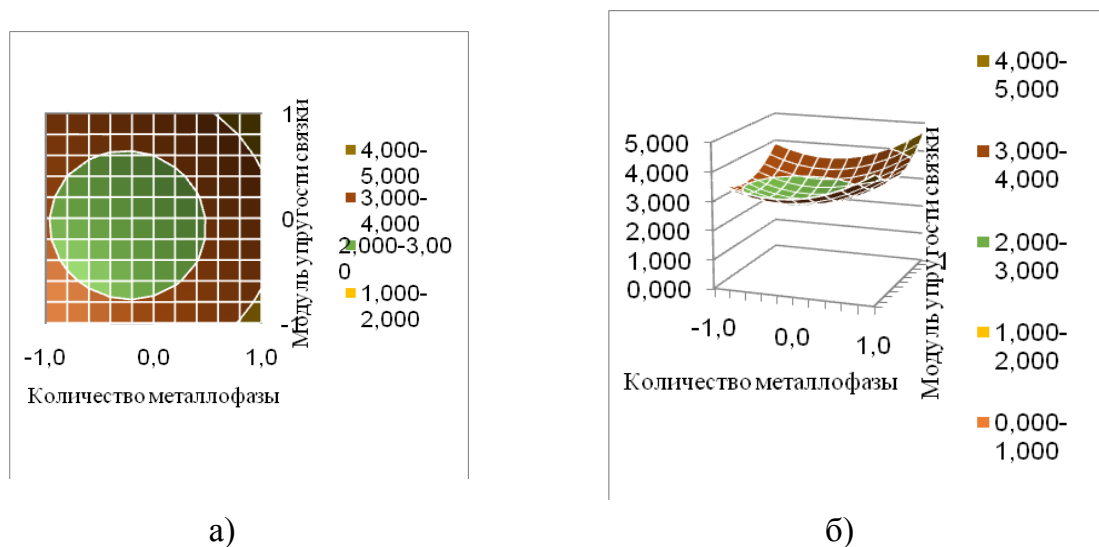


Рисунок 5 – Двухмерные (а) и трехмерные (б) зависимости, отражающие влияние количества металлофазы и модуля упругости связи на НДС системы

На рис. 6 представленны зависимости напряжений, возникающих в системе «зерно–связка–металлофаза» от количества металлофазы при изменении температуры спекания.

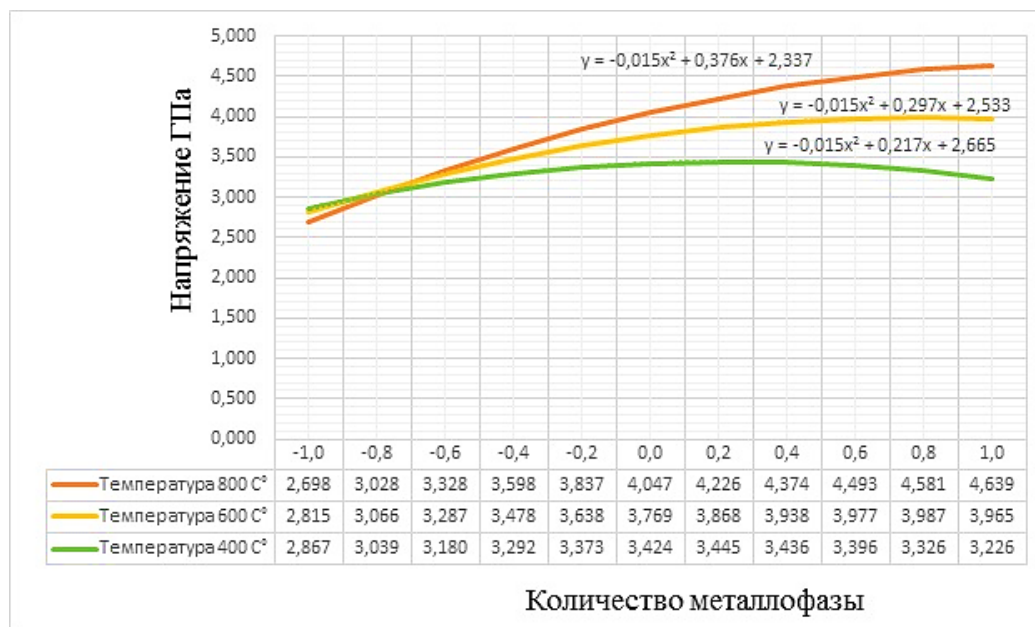


Рисунок 6 – Зависимость напряжений в системе от количества металлофазы при изменении температуры спекания

Выводы и перспективы развития. Проведенные теоретические исследования показали, что температура спекания алмазоносного слоя, оказывает наибольшее влияние на НДС системы «алмазное зерно – металлофаза - связка», независимо от вида связки. Увеличение напряжений в зёрнах наблюдается в местах сосредоточения металлофазы в зерне. Наличие большого количества металлических включений в кристаллах приводит к снижению их прочности и особенно термостойкости. Определено, что нагрев синтетических алмазов, начиная с температуры 750°C, приводит к снижению их прочности.

Причиной растрескивания алмазного зерна является различное значение коэффициентов термического расширения металлофазы (остатков металла-катализатора) и самого зерна. Как правило, коэффициент термического расширения металла-катализатора гораздо больше, чем у алмаза. Поэтому при нагревании происходит, так называемый разрыв алмазного зерна изнутри.

Установлено, что наименьшие напряжения наблюдаются при использовании металлической связи (модуль упругости $2.04\text{E}+11 \text{ Н/м}^2$), с одной металлофазой на основе никеля (КТР $1.32\text{E}-05 \text{ 1/К}$).

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности применения алмазных зерен с минимально возможным содержанием металлофазы, преобладающим элементом в составе которой должен быть металл с низким коэффициентом теплового расширения. Это позволит значительно увеличить коэффициент использования алмазных зерен и повысить экономичность процесса алмазного шлифования.

Список использованных источников: 1. Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов.-Х.,1980.-192 с. 2. Федорович В.О. Розробка наукових основ та способів практичної реалізації управління пристосовуваністю при алмазному шліфуванні надтвердих матеріалів. Автореф. дис.... докт. техн. наук 05.03.01 – Харків, 2002, 34с. 3. Heisel U, Krivoruchko DV, Zaloha VA, Storchak M (2007) CauseAnalysis of Errors in FE Prediction Orthogonal Cutting Performances. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. Calabria 141–148. 4. Rizzutti S, Umbrello D, M'Saoubi R, Outeiro JC (2007) Modelling and Validation of Tool Wear During Hard Machining of AISI H13 Tool Steel. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 293–300 5. Ivester RW, Whintont E, Heigel J (2007) Measuring Chip Segmentation by High-Speed Microvideography and Comparison to Finite-Element Modelling Simulations. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 37–44 6. Fischer C (2007) Runtime and Accuracy Issues in Three Dimensional Finite Element Simulation of Machining Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 45–50. 7. Marusich TD, Usui S, Stephenson DA (2007) Finite Element Modelling of Drilling Processes with Solid and Indexable Tooling in Metals and Stack-ups. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 51–58. 8. Denkena B, de Leon Garcia L, Köhler J (2007) FEM-Simulation of High-Performance-Milling. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 149–156. 9. Dix M, Leopold J, Neugebauer R (2007) Investigations on the Influence of Local Material Properties of Burr Formation. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 133–140. 10. P. Krajnik, J. Kopac A review of High-Speed Grinding and High-Performance Abrasive Tools, Journal of Mechanical Engineering, Vol. 50/4, 2004. 11. J. Kovac, et al., A Feasibility Investigation of High-speed Low Damage Grinding of Advanced Ceramics, Proc. of the 1th Int. Grinding Conference, SME, 1993. 12. K. Syoji, N. Yamazaki, R. Watanabe and T. Kuriyagawa, Influence of Wheel Surface Speed on Grindability of Grinding Material - Studies on Ultra-High Speed Grinding (3rd Report, J of JSPE (Japan Society of Precision Engineering), 2000.–p.1145-1149. 13. S. Ebrell, W.B. Rowe, M.N. Morgan Process Characterisation of Grinding AISI 52100 with Vitrified CBN. Key Engineering Materials Vols.:Trans Tech Publications Switzerland, 2003. – p. 333-340. 14. S.C. Salmon Modern Grinding Process Technology, McGraw-Hill, Inc., 1992.

15. W. Renaud, M. Hitchiner The Development of Camshaft Lobe Grinding with Vitrified cBN. 1st Int. Machining and Grinding Conf.– Michigan: SME,1995. 16. Мишинаевский Л.Л. Оптимизация свойств инструментов из СТМ при шлифовании конструкционных металлов/ Сверхтвердые материалы, - 1985. № 3. - 45-49 с. 17. E. Galen Superabrasive Grinding, Why Bond Selection Matters, Manufacturing Engineering Magazine, SME, 2001, 18. Мишинаевский Л.Л., Корж Н.Я. Профильное шлифование кругами из сверхтвердых материалов/ Сверхтвердые материалы, 1979. – 54-57 с. 19. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: Монография в 6 томах. Под общей ред. Н. В. Новикова — Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2003—2007 гг. 20. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6-и т. / Под общей ред. Н.В. Новикова. – Т.6: Алмазно-абразивные инструменты в технологиях механообработки / Под ред. А.А. Шепелева. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006. – 340 с.

Bibliography (transliterated): 1. Semko M.F., Grabchenko A.I., Hodorevskij M.G. Almaznoe shlifovanie sinteticheskikh sverhtverdykh materialov.-H.,1980.-192 s. 2. Fedorovich V.O. Rozrobka naukovih osnov ta sposobiv praktichnoї realizacії upravlinnja pristosovuvannistju pri almaznomu shlifuvanni nadtverdih materialiv. Avtoref. dis.... dokt. tehn. nauk 05.03.01 – Harkiv, 2002, 34s. 3. Heisel U, Krivoruchko DV, Zaloha VA, Storchak M (2007) CauseAnalysis of Errors in FE Prediction Orthogonal Cutting Performances. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. Calabria 141–148. 4. Rizzutti S, Umbrello D, M'Saoubi R, Outeiro JC (2007) Modelling and Validation of Tool Wear During Hard Machining of AISI H13 Tool Steel. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 293–300 5. Ivester RW, Whitenton E, Heigel J (2007) Measuring Chip Segmentation by High-Speed Microvideography and Comparison to Finite-Element Modelling Simulations. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 37–44 6. Fischer C (2007) Runtime and Accuracy Issues in Three Dimensional Finite Element Simulation of Machining Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 45–50. 7. Marusich TD, Usui S, Stephenson DA (2007) Finite Element Modelling of Drilling Processes with Solid and Indexable Tooling in Metals and Stack-ups. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 51–58. 8. Denkena B, de Leon Garcia L, Köhler J (2007) FEM-Simulation of High-Performance-Milling. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 149–156. 9. Dix M, Leopold J, Neugebauer R (2007) Investigations on the Influence of Local Material Properties of Burr Formation. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 133–140. 10. P. Krajnik, J. Kopac A review of High-Speed Grinding and High-Performance Abrasive Tools, Journal of Mechanical Engineering, Vol. 50/4, 2004. 11. J. Kovac, et al., A Feasibility Investigation of High-speed Low Damage Grinding of Advanced Ceramics, Proc. of the 1th Int. Grinding Conference, SME, 1993. 12. K. Syoji, N. Yamazaki, R. Watanabe and T. Kuriyagawa, Influence of Wheel Surface Speed on Grindability of Grinding Material - Studies on Ultra-High Speed Grinding (3rd Report, J of JSPE (Japan Society of Precision Engineering), 2000.–p.1145-1149. 13. S. Ebrell, W.B. Rowe, M.N. Morgan Process Characterisation of Grinding AISI 52100 with Vittrified CBN. Key Engineering Materials

Vols.:Trans Tech Publications Switzerland, 2003. – p. 333-340. 14. S.C. Salmon Modern Grinding Process Technology, McGraw-Hill, Inc., 1992. 15. W. Renaud, M. Hitchiner The Development of Camshaft Lobe Grinding with Vitrified cBN. 1st Int. Machining and Grinding Conf.– Michigan: SME,1995. 16. Mishnaevskij L.L. Optimizacija svojstv instrumentov iz STM pri shlifovanii konstrukcionnyh metallov/ Sverhtverdye materialy, - 1985. № 3. - 45-49 s. 17. E. Galen Superabrasive Grinding, Why Bond Selection Matters, Manufacturing Engineering Magazine, SME, 2001, 18. Mishnaevskij L.L., Korzh N.Ja. Profil'noe shlifovanie krugami iz sverhtverdyh materialov/ Sverhtverdye materialy, 1979. – 54-57 s. 19. Sverhtverdye materialy. Poluchenie i primenenie: Monografija v 6 tomah. Pod obshhej red. N. V. Novikova — Kiev: ISM im. V. N. Bakulja, IPC «ALKON» NANU, 2003—2007 gg. 20. Sverhtverdye materialy. Poluchenie i primenenie: V 6-i t. / Pod obshhej red. N.V. Novikova. – T.6: Almazno-abrazivnye instrumenty v tehnologijah mehanooobrabotki / Pod red. A.A. Shepeleva. – K.: ISM im. V.N. Bakulja, IPC «ALKON» NANU, 2006. – 340 s.

УДК 621.923:[621.922:621.921.34]

Ю.Д. ФИЛАТОВ, д-р техн. наук, **В.И. СИДОРКО**, д-р техн. наук,
А.Ю. ФИЛАТОВ, канд. техн. наук, **С.В. КОВАЛЕВ**, канд. техн. наук,
А.Г. ВЕТРОВ, **Я.Л. СИЛЬЧЕНКО**,
М.А. ДАНИЛЬЧЕНКО, Киев, Украина

ПОЛИРОВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

В результаті дослідження закономірностей полірування плоских поверхонь оптико-електронних елементів з монокристалічних карбиду кремнію та сапфіру показано, що в якості критеріїв ефективності полірування доцільно використовувати енергію переносу, максимальні значення якої відповідають мінімальній шорсткості, та коефіцієнти шорсткості, що визначають мінімально припустимі значення висотних параметрів.

В результате исследования закономерностей полирования плоских поверхностей оптико-электронных элементов из монокристаллического карбида кремния и сапфира показано, что в качестве критериев эффективности полирования целесообразно использовать энергию переноса, максимальные значения которой соответствуют минимальной шероховатости, и коэффициенты шероховатости, определяющие минимально допустимые значения высотных параметров.

As a result of studies of regularities polishing flat surfaces of optoelectronic components of single crystal silicon carbide and sapphire shown that as polishing performance criteria appropriate to use the energy transfer, the maximum values of which correspond to the minimum roughness and roughness coefficients that determine the minimum permissible altitude parameters.

Введение

Элементы и подложки из монокристаллических материалов, в том числе из карбида кремния и сапфира, широко применяющиеся в оптикоэлектронной технике, в современном производстве изготавливают при помощи методов алмазно-абразивной обработки. Особую сложность

© Ю.Д. Филатов, В.И. Сидорко, А.Ю. Филатов, С.В. Ковалев, А.Г. Ветров,
Я.Л. Сильченко, М.А. Данильченко, 2015

представляет операция полирования, которую осуществляют в один или несколько переходов в зависимости от требований, предъявляемых к обрабатываемой поверхности. Полированные поверхности должны удовлетворять требованиям по точности формы (3–5 интерференционных колец) и по качеству обработки ($S-d$) от 60–40 до 20–10 (U.S Military Surface Quality Specification, MIL-PRF-13830B). Поверхности подложек, подготовленные под нанесение эпитаксиального слоя (epi-ready) должны удовлетворять требованиям, регламентирующим точность ориентации плоскости кристалла ($\pm 0,2-0,5^\circ$), плотность дислокаций ($(1-4) \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$), плотность микропапов (менее 30 см^{-2}), структурное совершенство (FWHM – полуширина линии качания – 30–50 угл. сек), а также «оптическим» требованиям по неплоскостности (менее 10 мкм на диаметре 3 дюйма) и шероховатости ($Ra = 0,3-1,0 \text{ нм}$). Шероховатость обработанной поверхности является наиболее важным показателем процесса полирования прецизионных поверхностей элементов оптоэлектроники из неметаллических материалов [1–5] и характеризует качество обработанных поверхностей, устанавливает их зависимость от размеров частиц шлама и их концентрации в зоне контакта [6–7]. Улучшение качества обработки оптико-электронных элементов из монокристаллических материалов может быть достигнуто только при использовании новых полировальных суспензий и коллоидных систем из наночастиц, оптимизация характеристик которых является актуальной.

Целью исследования является изучение влияния свойств обрабатываемого материала и полировальной суспензии или коллоидной системы на шероховатость обработанных поверхностей.

Методика исследований

Плоские поверхности элементов из карбида кремния (плоскость С) и сапфира (плоскость А) полировали на шлифовально-полировальном станке при частоте вращения полировальника 90 об/мин, давлении прижима детали к притиру 0,003–0,005 МПа, смещении штриха 30 мм, длине штриха 50 мм и средней температуре в зоне контакта 300 К. Монокристаллический карбид кремния (политип 6H-SiC, плотность $3,21 \text{ г/см}^3$, коэффициент теплопроводности 490 Вт/(м·К) , статическая диэлектрическая проницаемость – 6,5, постоянные решетки $a = 0,3073 \text{ нм}$ и

$c = 1,511$ нм [8]) характеризовался частотами собственных колебаний молекулярных фрагментов SiC: $15,0 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ (794 см^{-1}) и $18,9 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ (1000 см^{-1}) [9, 10]. Монокристаллы сапфира (плотность $3,98 \text{ г/см}^3$, коэффициент теплопроводности $30,3 \text{ Вт/(м·К)}$, статическая диэлектрическая проницаемость – $9,3$ для плоскости A , постоянные решетки $a = 0,4758$ нм, $c = 1,2991$ нм) характеризовались частотами собственных колебаний молекулярных фрагментов Al_2O_3 : $10,8 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ (573 см^{-1}), $12,1 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ (642 см^{-1}) и $14,1 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ (748 см^{-1}).

Закономерности полирования монокристаллов карбида кремния и сапфира исследовали при использовании специально приготовленных суспензий из алмазных микропорошков (1), порошков кубического нитрида бора cBN (2) и порошков МАХ-фазы Ti_3AlC_2 (3) [8, 10], а также коллоидных систем из наночастиц полировальных порошков (4, 5). Частоты собственных колебаний (см^{-1}) молекулярных фрагментов полировальных порошков алмаза – 1135 и 1332, кубического нитрида бора – 1056, 1100, 1304 и порошков МАХ-фазы Ti_3AlC_2 – 260, 420, 605, 1320 и 1590 [10]. Статическая диэлектрическая проницаемость полировальных порошков алмаза – $5,7$, cBN – $2,5$ и Ti_3AlC_2 – $3,5$ [20].

Закономерности формирования шероховатой поверхности элементов из монокристаллического карбида кремния и сапфира.

На основе результатов исследования механизма формирования шероховатости обрабатываемой поверхности [11, 12] разработан метод компьютерного моделирования микропрофиля, который позволяет рассчитать высоту микро- и нанонеровностей. Высота нанонеровностей полированной поверхности пропорциональна поверхностной плотности частиц шлама (квадрату модуля функции состояния кластера $|\psi|^2$, м^{-1}) в соответствии с формулой $z(x) = k|\psi|^2$ [11, 12], а коэффициент пропорциональности определяется как $(d_i/2)^2$ (d_i – размер частиц шлама). Для расчета высоты неровностей профиля полированной поверхности, когда линии выступов и впадин практически совпадают со средней линией профилограммы, коэффициент пропорциональности в формуле для расчета нанопрофиля $z(x)$ определяется как d_i^2 . Функция, определяющая

высоту нанонеровностей поверхности в процессе полирования, вдоль базовой линии выражается через функции параболического цилиндра.

Для расчета нанопрофиля полированной поверхности необходимо и достаточно определить размеры частиц шлама $d(k_i) = [S_0(k_i + 1)/\pi]^{1/2}$ и функцию их распределения по размерам. Метод компьютерного моделирования нанопрофиля поверхностей элементов из монокристаллических материалов при полировании основан на методе Монте-Карло и позволяет рассчитать высоту неровностей профиля поверхности $Z(x)$. По модельным профилограммам полированной поверхности, определялись высотные параметры шероховатости: среднее

арифметическое отклонение профиля $Ra = \frac{1}{L} \int_0^L Z(x) dx$, среднее

квадратичное отклонение профиля $Rq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L [z(x)]^2 dx}$ и наибольшая

высота профиля $Rmax$.

В результате компьютерного моделирования при усреднении высотных параметров шероховатости по пяти модельным профилограммам получены значения Ra , Rq , $Rmax$, величины отношения $\chi = Rmax/Ra$, а также коэффициенты относительной шероховатости $k_a = Ra/a_v$, $k_q = Rq/a_v$ и $k_m = Rmax/a_v$, нормированные на наиболее вероятный размер частицы шлама (табл. 1, 2).

Таблица 1 – Параметры шероховатости полированной поверхности карбида кремния

Параметры шероховатости полированной поверхности	Полировальный состав			
	1	2	3	4
Ra , нм	5,4±0,1	5,6±0,2	5,1±0,2	4,6±0,1
Rq , нм	5,8±0,2	5,9±0,2	5,4±0,2	4,7±0,1
$Rmax$, нм	9,3±0,9	8,2±1,1	7,4±0,5	6,5±0,2
χ	1,7	1,5	1,5	1,4
k_a	2,3	2,1	2,1	1,7
k_q	2,4	2,2	2,2	1,8
k_m	3,9	3,0	3,1	2,5

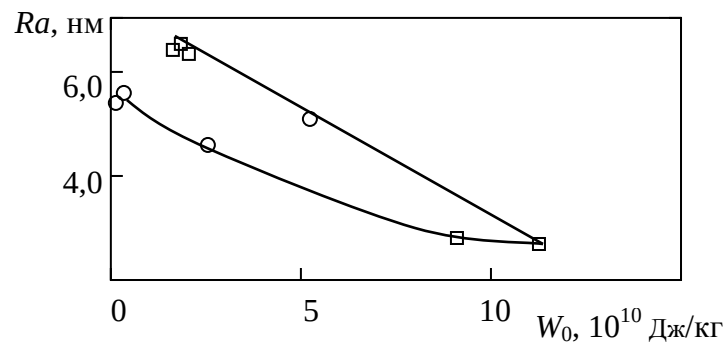
Таблица 2 – Параметры шероховатости полированной поверхности сапфира

Параметры шероховатости поверхности	Полировальный состав				
	1	2	3	4	5
Ra , нм	6,3±0,3	6,5±0,2	6,4±0,2	2,8±0,2	2,7±0,1
Rq , нм	6,7±0,2	7,0±0,2	6,8±0,3	3,0±0,2	2,9±0,1
$Rmax$, нм	12,3±0,2	12,8±1,4	12,9±1,0	4,7±0,3	4,7±0,2
χ	1,9	2,0	2,0	1,6	1,7
k_a	2,5	2,3	2,3	1,4	1,4
k_q	2,7	2,4	2,5	1,5	1,4
k_m	4,9	4,4	4,7	2,3	2,3

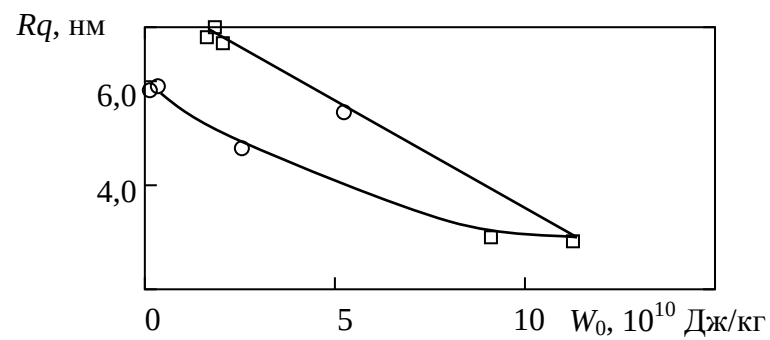
В результате анализа приведенных данных показано, что высотные параметры шероховатости Ra , Rq и $Rmax$ уменьшаются при увеличении энергии переноса (рис. 1).

Чем больше энергии затрачивается на образование и удаление с обрабатываемой поверхности частиц шлама, тем меньше их размеры и соответственно высота нанопрофиля полированной поверхности. Именно поэтому величина энергии переноса может быть использована в качестве критерия эффективности полирования монокристаллических карбида кремния и сапфира. На рис. 2 приведены значения коэффициентов шероховатости k_a , k_q , k_m и χ , характеризующих процессы формирования нанопрофиля обработанных поверхностей элементов из карбида кремния (*a*) и сапфира (*б*) при полировании полировальными суспензиями (1)–(3) и коллоидными системами (4)–(5).

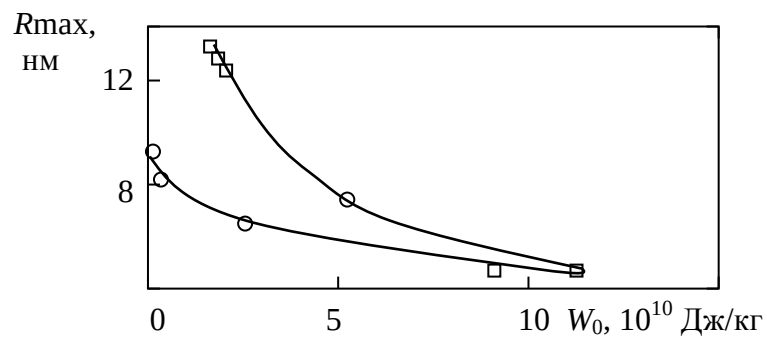
В отличие от процессов шлифования неметаллических материалов при условии $d_i > Rmax$, когда коэффициенты шероховатости k_a , k_q , $k_m < 1$ и $\chi > 1$ [11], для полирования монокристаллического карбида кремния и сапфира при условии $d_i \leq Rmax$ эти коэффициенты k_a , k_q , k_m , $\chi > 1$ и уменьшаются при улучшении качества обработки. Для сравнения эффективности применения различных полировальных составов достаточно найти минимальные значения указанных коэффициентов.



a



б



в

Рисунок 1 – Зависимость параметров шероховатости полированных поверхностей Ra (a), Rq (б) и R_{max} (в) от энергии переноса ($\square$ – карбид кремния, $\circ$ – сапфир)

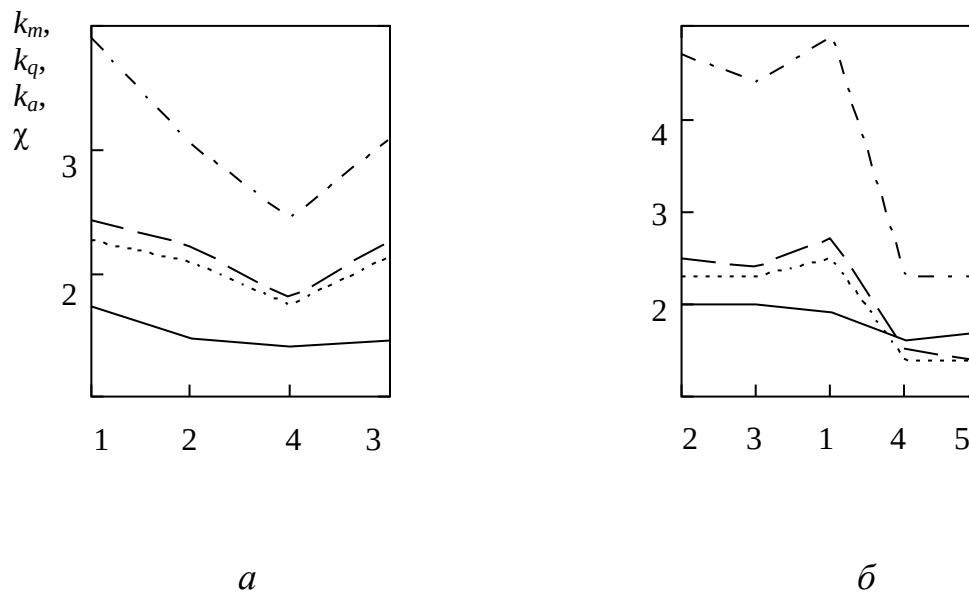


Рисунок 2 – Коэффициенты k_a , k_q , k_m и χ , характеризующие шероховатость поверхностей элементов из карбида кремния (а) и сапфира (б) при полировании полировальными суспензиями (1)–(3) и коллоидными системами (4)–(5)

Минимальными значениями коэффициентов шероховатости k_a , k_q , k_m , χ (рис. 2) характеризуется шероховатость поверхностей элементов из монокристаллического карбида кремния, обработанных при помощи коллоидной системы (4), и сапфира, полирование которых осуществлялось при помощи коллоидных систем (4)–(5). Сравнивая значения этих коэффициентов для процессов шлифования и полирования, можно заключить, что коэффициенты шероховатости k_m , k_q и k_a уменьшаются на 1–2 порядка величины, что позволяет говорить о принципиальных отличиях в механизмах формирования микро- и нанорельефа обрабатываемой поверхности. Сравнивая значения приведенных коэффициентов шероховатости для процессов обработки карбида кремния и сапфира при помощи различных полировальных составов, можно утверждать, что полирование целесообразно осуществлять при помощи суспензий полировальных порошков, а нанополирование с помощью коллоидных систем из наночастиц.

Выводы

В результате теоретических и экспериментальных исследований закономерностей полирования плоских поверхностей оптико-электронных элементов из монокристаллического карбида кремния и сапфира показано, что в качестве критерия эффективности полирования следует использовать энергию переноса, поскольку ее максимальные значения соответствуют минимальным параметрам шероховатости. В результате компьютерного моделирования нанопрофиля обработанных поверхностей элементов оптоэлектроники из карбида кремния и сапфира построены расчетные профилограммы, по которым определены значения высотных параметров шероховатости Ra , Rq и R_{max} и коэффициентов шероховатости k_a , k_q , k_m , χ , по минимальным значениям которых можно количественно оценить эффективность полирования при помощи различных полировальных составов.

Список использованных источников: 1. Шероховатость поверхностей при финишной алмазно-абразивной обработке / Филатов Ю.Д., Сидорко В.И., Филатов А.Ю. и др. // Сверхтв. материалы. – 2009. – № 3. – С. 68–74. 2. Filatov Y.D., Sidorko V.I., Filatov O.Yu. et al. Surface Quality Control in Diamond Abrasive Finishing // Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI., Proc. of SPIE. – 2009. – 7389. – P. 73892–73892-O. 3. Филатов Ю.Д., Яцук В.П., Филатов А.Ю. и др. Оценка шероховатости и отражательной способности поверхностей изделий из неметаллических материалов при финишной алмазно-абразивной обработке // Сверхтвердые матер. – 2009. – № 5. – С. 70–81. 4. Filatov Yu.D., Filatov O.Yu., Heisel U. et al. In situ control of roughness of processed surfaces by reflectometric method // Optical Micro- and Nanometrology III, Proc. SPIE. – 2010. – 7718. – P. 77181J. 5. Filatov Y.D., Filatov O.Y., Monteil G. et al. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials // Optical Eng. – 2011. – 50, art. 063401–063401–7. 6. Филатов Ю.Д. Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтв. материалы. – 2001. – № 3. – С. 36–49. 7. Филатов Ю. Д. Полирование прецизионных поверхностей деталей из неметаллических материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтв. материалы. – 2008. – № 1. – С. 59–66. 8. Properties of Silicon Carbide edited by Gary Lynn Harris / Published by: INSPEC, Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 1995. – 289 p. 9. Филатов Ю.Д., Ветров А.Г., Сидорко В.И. и др. Закономерности финишной алмазно-абразивной обработки монокристаллического карбида кремния // Сверхтвердые материалы. – 2013. – № 5. – С. 63–71. 10. Полирование элементов оптико-электронной техники из монокристаллического

карбида кремнія / Ю.Д. Філатов, А.Г. Ветров, В.И. Сидорко и др. // Сверхтв. материалы. – 2015. – № 1. – С. 63–71. 11. Filatov Yu.D., Mechanism of formation of surface microrelief in machining glass // J. Superhard Mater. – 1991. – 13(5). – P. 63–67. 12. Філатов Ю.Д., Рогов В.В., Громов К.С. Шероховатость поверхности при обработке стекла // Сверхтвердые материалы. – 1993. – № 4. – С. 42–46.

Bibliography (transliterated): Workshop on Modeling of Machining Operations. 51–58. 8. Denkena B, de Leon Garcia L, Köhler J (2007) FEM-Simulation of High-1. Sherohovatost' poverhnostej pri finishnoj almazno-abrazivnoj obrabotke / Filatov Ju.D., Sidorko V.I., Filatov A.Ju. i dr. // Sverhtv. materialy. – 2009. – № 3. – S. 68–74. 2. Filatov Y.D., Sidorko V.I., Filatov O.Yu. et al. Surface Quality Control in Diamond Abrasive Finishing // Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI, Proc. of SPIE. – 2009. – 7389. – P. 73892–73892-O. 3. Filatov Ju.D., Jashhuk V.P., Filatov A.Ju. i dr. Ocenka sherohovatosti i otrazhatel'noj sposobnosti poverhnostej izdelij iz nemetallicheskih materialov pri finishnoj almazno-abrazivnoj obrabotke // Sverhtverdye mater. – 2009. – № 5. – S. 70–81. 4. Filatov Yu.D., Filatov O.Yu., Heisel U. et al. In situ control of roughness of processed surfaces by reflectometric method // Optical Micro- and Nanometrology III, Proc. SPIE. – 2010. – 7718. – P. 77181J. 5. Filatov Y.D., Filatov O.Y., Monteil G. et al. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials // Optical Eng. – 2011. – 50, art. 063401–063401–7. 6. Filatov Ju.D. Polirovanie aljumosilikatnyh materialov instrumentom so svjazannym poliroval'nym poroshkom // Sverhtv. materialy. – 2001. – № 3. – S. 36–49. 7. Filatov Ju. D. Polirovanie precizionnyh poverhnostej detalej iz nemetallicheskih materialov instrumentom so svjazannym poliroval'nym poroshkom // Sverhtv. materialy. – 2008. – № 1. – S. 59–66. 8. Properties of Silicon Carbide edited by Gary Lynn Harris / Published by: INSPEC, Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 1995. – 289 p. 9. Filatov Ju.D., Vetrov A.G., Sidorko V.I. i dr. Zakonomernosti finishnoj almazno-abrazivnoj obrabotki monokristallicheskogo karbida kremnija // Sverhtverdye materialy. – 2013. – № 5. – S. 63–71. 10. Polirovanie jelementov optiko-jelektronnoj tehniki iz monokristallicheskogo karbida kremnija / Ju.D. Filatov, A.G. Vetrov, V.I. Sidorko i dr. // Sverhtv. materialy. – 2015. – № 1. – S. 63–71. 11. Filatov Yu.D., Mechanism of formation of surface microrelief in machining glass // J. Superhard Mater. – 1991. – 13(5). – P. 63–67. 12. Filatov Ju.D., Rogov V.V., Gromov K.S. Sherohovatost' poverhnosti pri obrabotke stekla // Sverhtverdye materialy. – 1993. – № 4. – S. 42–46.

УДК 621.002

А.Н. ШЕЛКОВОЙ, д-р техн. наук,
Л.Б. ШРОН, канд.техн. наук, **Г.И. ИЩЕНКО**,
А.Р. РУЗМЕТОВ, **М.С. СЕМЧЕНКО**, Харьков, Украина

К ВОПРОСУ О ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ МАШИННО-РУЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ В СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

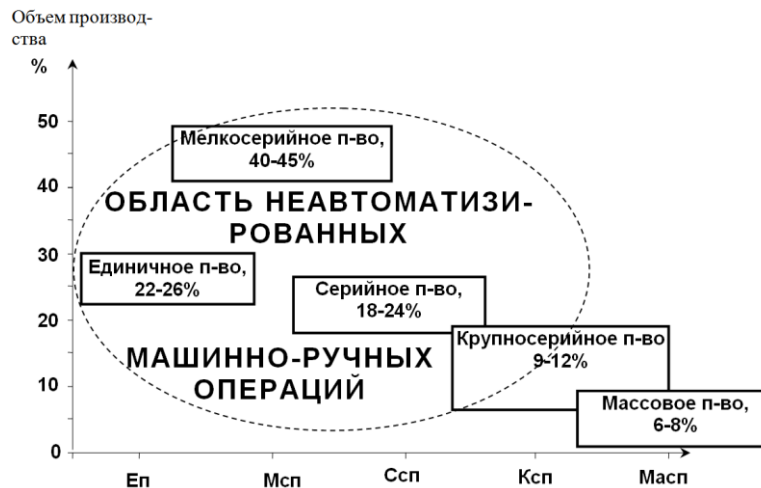
У статті приведений опис системи проектування машинно-ручних технологічних операцій (МРТО) обробки металів різанням на основі використання методів імітаційного моделювання. Виконані: постановка завдання, його математичний опис і методика проектування, також наведені результати розрахунку параметрів МРТО для конкретного виду виробництва.

В статье приведено описание системы проектирования машинно-ручных технологических операций (МРТО) обработки металлов резанием на основе использования методов имитационного моделирования. Выполнены: постановка задачи, ее математическое описание и методика проектирования, а так же приведены результаты расчета параметров МРТО для конкретного вида производства.

Description of the system of planning of machine-hand technological operations (МНТО) of treatment of metals cutting on the basis of the use of methods of imitation design is brought in the article. Executed: raising of task, her mathematical description and design technique, and results over of calculation of parameters of МНТО are similarly brought for the concrete type of production.

Введение. Машинно-ручные технологические операции (МРТО) в обработке металлов резанием не ушли в небытие с приходом автоматизации во все сферы деятельности машиностроительного производства, а, по-прежнему, составляют существенную долю производственного процесса (рис. 1), [1].

© **А.Н. Шелковой, Л.Б. Шрон, Г.И. Ищенко, А.Р. Рузметов, М.С. Семченко, 2015**



Виды производственных процессов

Рисунок 1 – Соотношение объемов производства для разных видов серийности:
Еп - единичное, Мсп - мелкосерийное, Ссп - среднесерийное,
Ксп - крупносерийное, Масп - массовое

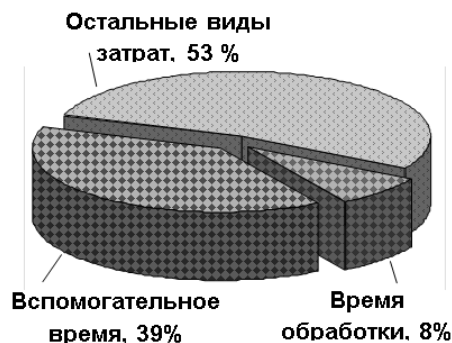
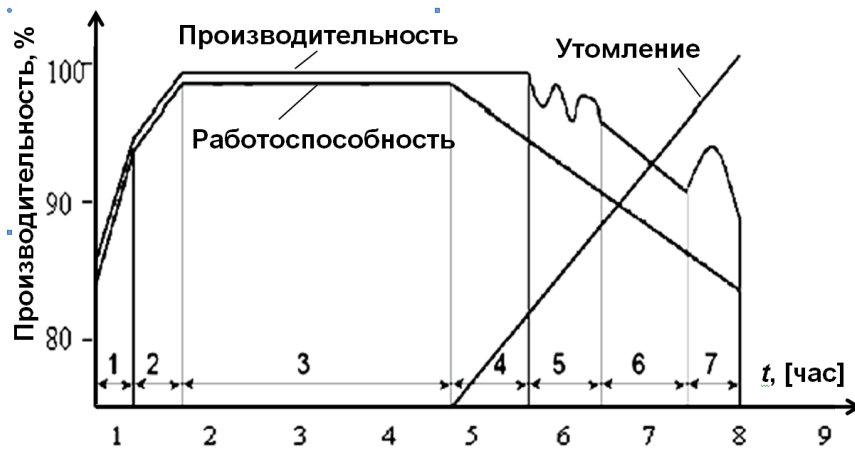


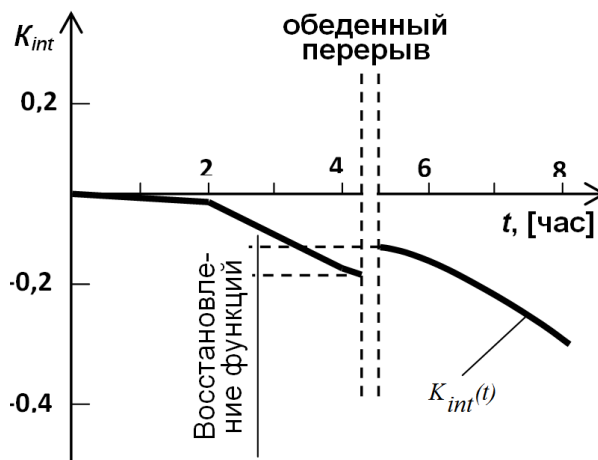
Рисунок 2 – Структура штучного времени
для цехов с универсальным металлорежущим оборудованием

При этом в МРТО доля вспомогательного времени может в несколько раз превышать долю основного времени (времени обработки, рис. 2).

Стохастическое изменение работоспособности рабочего с тенденцией к ухудшению его производительности (рис. 3, а), невозможность его функционального восстановления в перерывы (рис. 3, б) являются теми преградами, который мешают точно рассчитать технологические параметры МРТО по аналогии с тем, как это делается для робототехнических комплексов и ГПС.



- А) Типичная кривая работоспособности основного рабочего в течение смены (крупносерийное производство): 1 – экстремное вработывание; 2 – тонкое вработывание; 3 – устойчивая работоспособность; 4 – полная компенсация утомления; 5 – неустойчивая компенсация утомления; 6 – падение продуктивности; 7 – “конечный порыв”



- Б) Кривая работоспособности рабочего на протяжении смены в условиях мелкосерийного производства:

$K_{int}(t)$ – интегральный показатель работоспособности рабочего на непрерывном отрезке времени (гностические функции, мышечная выносливость, двигательная реакция, сила мышц кисти руки)

Рисунок 3 – Человеческие факторы внутренней неопределенности машинно-ручной технологической операции

Поэтому создание системы проектирования МРТО на основе интеграции методов технологического и организационного проектирования сегодня по-прежнему является актуальной задачей.

Постановка задачи. Для понимания механизма взаимодействия человека с элементами системы обработки приведем обобщенную схему (рис. 4). Центральное место в ней занимают технологические и вспомогательные переходы, выполняемые в автоматическом и ручном режимах.

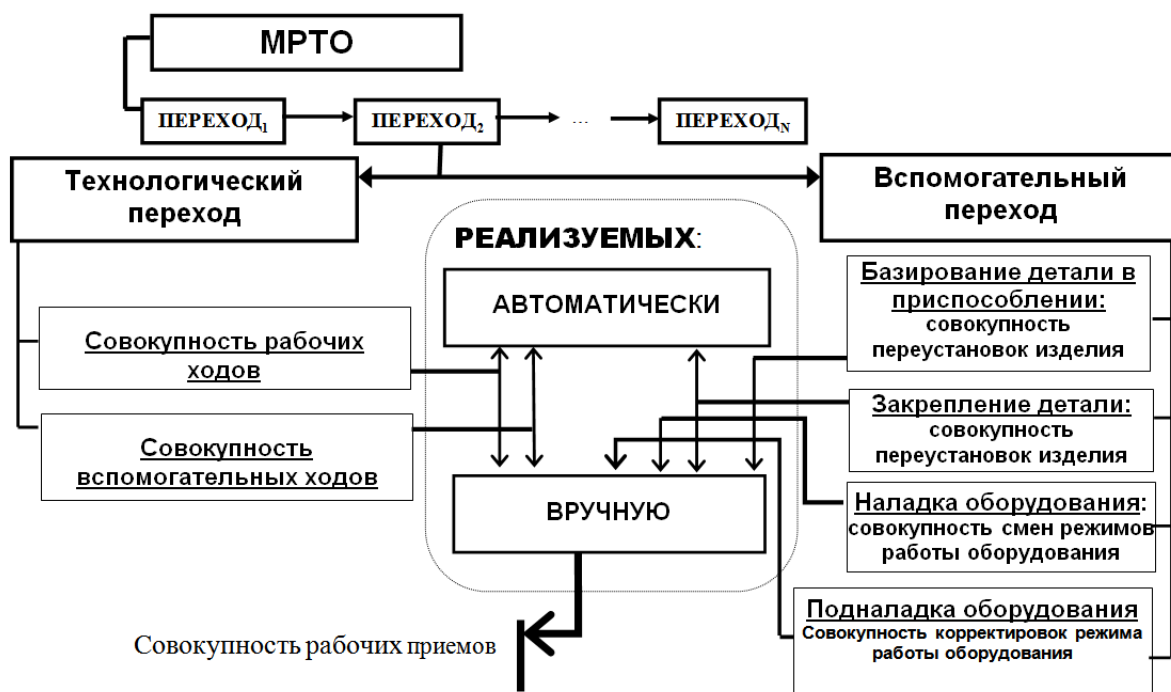


Рисунок 4 – Обобщенная схема внутренней структуры МРТО обработки металлов резанием (по ГОСТ 3.1109-82)

Математическая модель. Представим функциональную схему рабочего места станочника (рис. 5, а) в виде граф-дерева (рис. 5, б).

Структура вспомогательных переходов формируется исходя из: структур обрабатываемых и базовых поверхностей, а так же поверхностей, по которым выполняется зажим изделия в приспособлении (рис. 6), схемы управления станком, организационной структуры рабочего места.

Тогда алгоритм последовательности выполнения МРТО можно представить в виде моделирующего алгоритма (1)

$$\text{БЗИ}_1\text{BC}_1\text{B}_1\text{O}_2\text{B}_3\text{B}_4\text{O}_5\text{B}_6\text{u}_7 \begin{matrix} 7 \\ \uparrow \\ 10 \end{matrix} \text{И}_8\text{u}_9 \begin{matrix} 10 \\ \uparrow \\ 4 \end{matrix} \text{B}_{10}\text{O}_5\text{u}_9 \begin{matrix} 10 \\ \uparrow \\ 4 \end{matrix} \text{B}_{12}\text{B}_{13}\text{O}_{14}\text{B}_{15}\text{BC}_{16}\text{BC}_{17}\text{B}_{18}\text{u}_{19} \uparrow$$

$$\text{И}_{20}\text{B}_{18}, \quad (1)$$

где Б – базирование; З – закрепление; O_j – рабочий ход, где $j=1 \dots m$ – множество рабочих ходов; B_v – вспомогательный ход, где $v=1 \dots b$ – множество вспомогательных ходов; H_u – наладочные действия по смене инструмента и управлению станком; И_i – измерения, где $i=1 \dots n$ – множество исполнительных размеров; u_i – оператор выбора действия.

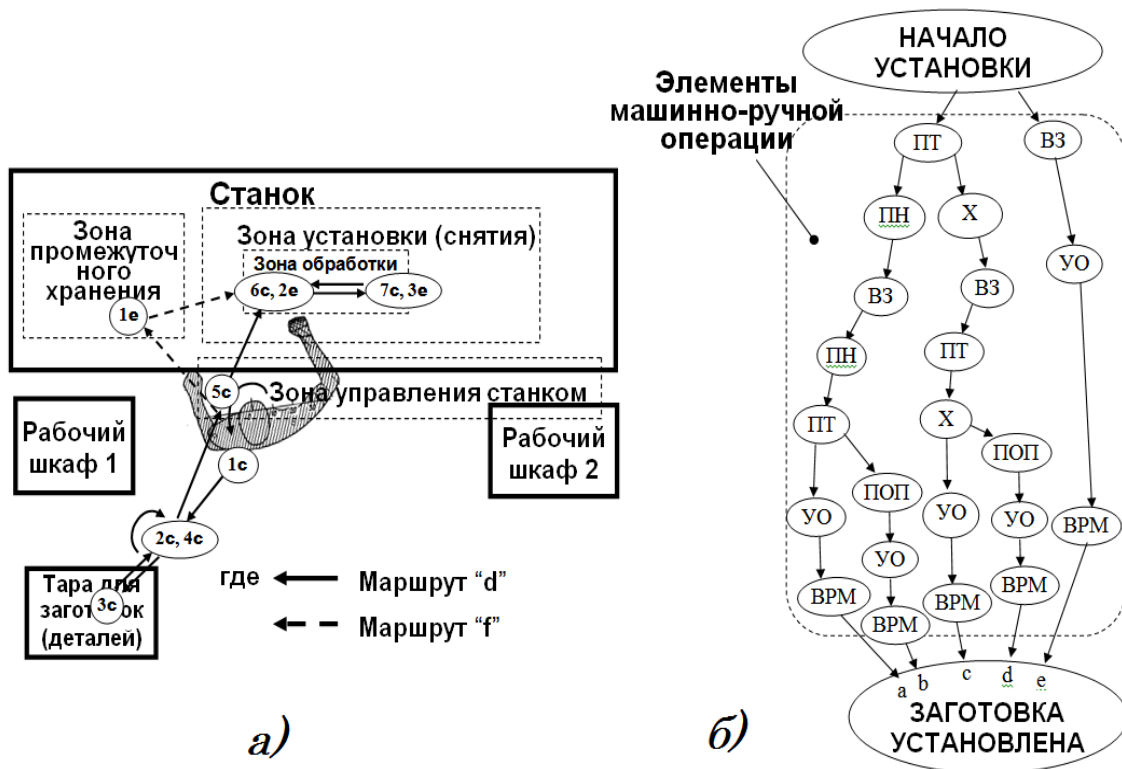


Рисунок 5 – Пример формального представления МРТО
 «Установка изделия в патроне с его поджатием задним центром»,
 выполняемой на токарном станке (а) в виде граф-дерева (б):
 ВЗ - взяться; ВРМ – вращать маховик; ПН – переместить ногу;
 ПОП – повернуть в пространстве; ПТ - повернуть туловище;
 УО – установить на вал или в отверстие; Х - идти с предметом

Для его функционирования разработана структурная модель [3], состоящая из: модели роста физического напряжения рабочего при выполнении вспомогательных переходов; модели роста информационного напряжения рабочего при выполнении вспомогательных переходов; модели формирования стереотипов рабочих приемов в виде их структур и последовательностей; модели изменения уровня надежности выполнения МРТО; модели выбора траекторий движения человека в процессе выполнения вспомогательных переходов (рис. 7).

Тогда структуру ограничений на область действия модели МРТО можно представить в виде перечня объектов, входящих в нее и описания их допустимых состояний (2)

$$X_i = \{ \langle \text{name} \rangle \Gamma, M_i^s, M_i^p, M_i^{pr}, T(R) \}, \quad (2)$$

где X_i - характеристики i -го объекта МРТО;

$\langle \text{name} \rangle$ – название объекта;

$\Gamma = L \times B \times H = (0,002-10) \times (0,002-5) \times (0,002-5)$, м – габариты объекта;

$M_{i3}^s, i3 = \overline{1, n3}$ – множество функциональных состояний объектов технологической системы: этапы подготовки, этапы реализации, завершение;

$M_{i4}^p, i4 = \overline{1, n4}$ – множество функциональных частей объекта;

$M_{i5}^{pr}, i5 = \overline{1, n5}$ – множество контактных групп свойств поверхностей:

- по прочности: крошащаяся (0,015-0,05), кгс; хрупкая (0,05-0,5), кгс; ломкая (0,5-3), кгс; прочная 3 min, кгс;
- по трению: скользкая поверхность, нормальная поверхность;
- по состоянию поверхности: гладкая, грубая, острая;
- по температуре: нормальная (12 – 45) °С; горячая (46-55) °С; очень горячая (55-120) °С;

$T(R)$ –обозначения диапазонов значений допустимых параметров: расстояния (0-15) м, усилия (0,01 - 30) кгс.

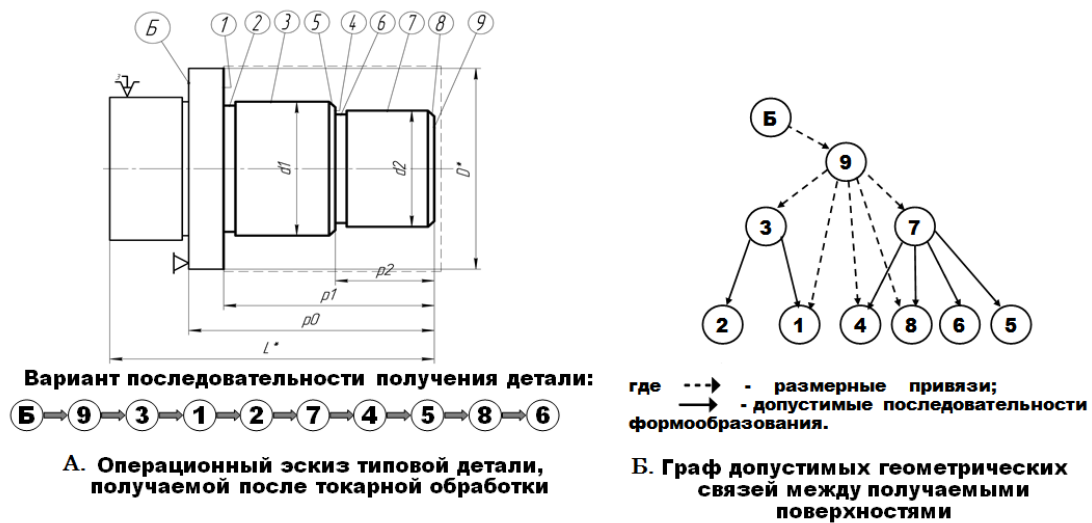


Рисунок 6 – Пример представления структуры обрабатываемых, базовых поверхностей и поверхностей зажима изделия на станке

Переход МРТО из $i3$ -го состояния в $i3+1$ -е состояние можно представить в виде (3)

$$m_{i3}^s \wedge \{G_1^i, G_2^i, \dots, G_{j1}^i, \dots, G_{n2}^i\} \rightarrow m_{i3+1}^s, \quad (3)$$

где $G_1^i, G_2^i, \dots, G_{j1}^i, \dots, G_{n2}^i$ – этапы функциональной активизации объекта i при его переходе из функционального состояния m_{i3}^s в состояние m_{i3+1}^s .

Оценка варианта структуры МРТО (Ext_v^j), задействованной для ее выполнения (рис. 5, б), выполняется с учетом ожидаемых суммарных затрат времени на выполнение рабочих приемов (Ext_v^j), входящих в нее (4). При этом оптимальным является тот вариант ее структуры, для которой значение Ext_v^j минимально (4)

$$\text{Ext}_v^j = \sum_{v1=1}^{n1} [c_{v1}^j + \text{Ext}_{v1}^j] \rightarrow \min, \quad (4)$$

где c_{v1}^j – относительная составляющая суммарной оценки выполнения рабочего приема;

Ext_{v1}^j – значение оценки структуры МРТО до добавления очередного приема.



Рисунок 7 – Обобщенная структурная модель МРТО [4]

Тогда моделирование процесса формирования структуры МРТО можно представить в виде схемы (рис. 8). В начальный момент времени задается последовательность приемов, которые должен выполнить рабочий при реализации МРТО в сложившихся организационно-технологических условиях на заданном технологическом оборудовании. Оценка эффективности их применения рассчитывается по (4) в соответствии с принятой структурой графа допустимых технологических приемов (например, рис. 5, б).

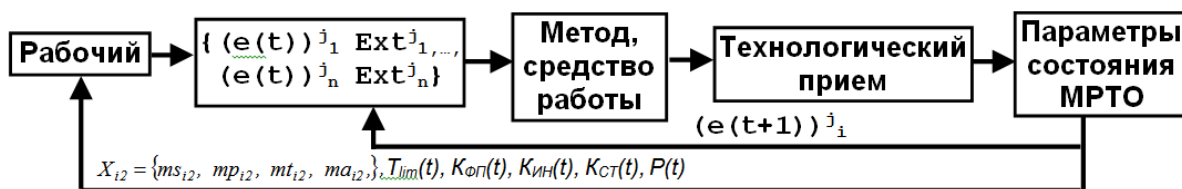


Рисунок 8 – Структурная схема оценки функциональности приемов, используемых в МРТО: $(e(t))^j_i$ и $(e(t+1))^j_i$ – поправочные коэффициенты оценки выполнения i -го метода работы в j -ой ситуации, в текущий и следующий моменты вспомогательной операции

Для оценки изменения длительности выполнения приемов введен коэффициент коррекции $e(t)$, который рассчитывается через определенные промежутки времени (5)

$$(e(t+1))_i^j = (e(t))_i^j + \Delta e_i^j, \quad (5)$$

где t – момент времени выполнения МРТО, в который производится оценка ее производительности;

Δe_i^j – величина коррекции поправочного коэффициента:

$$\Delta e_i^j = k_i^j \cdot \text{Ext}_i^j \cdot \frac{(\text{Pr}^n)_i^j - (\text{Pr}(t))_i^j}{n_i}, \quad (6)$$

где $(\text{Pr}^n)_i^j$ – лимит времени работы i -го комплекса микроэлементов при выполнении производственного задания в j -ой ситуации; $(\text{Pr}(t))_i^j$ – длительность выполнения производственного задания:

$$(\text{Pr}(t))_i^j = K e_i \times (\text{Pr}^n)_i^j, \quad (7)$$

где $K e_i$ – коэффициент эффективности реализации i -го комплекса микроэлементов, зависящий от запаса времени и объема выполненной работы ($K e_i \leq 1$; $K e_i \rightarrow 0$).

Методика моделирования. Предложенная математическая модель имитационного моделирования МРТО встроена в систему имитационного моделирования производственной системы на уровне участка (цеха). Она ориентирована на формирование структур и параметров рабочих мест.

Решения этой задачи осуществляется в три этапа (рис. 9): разработка структуры имитационной модели рабочего места; задание начальных условий его моделирования; имитационное моделирование МРТО.

Этот алгоритм реализован в виде системы имитационного моделирования «NORMA» (рис. 10). Она может встраиваться в систему имитационного моделирования производственных систем различной гибкости («GPS»), либо работать автономно.

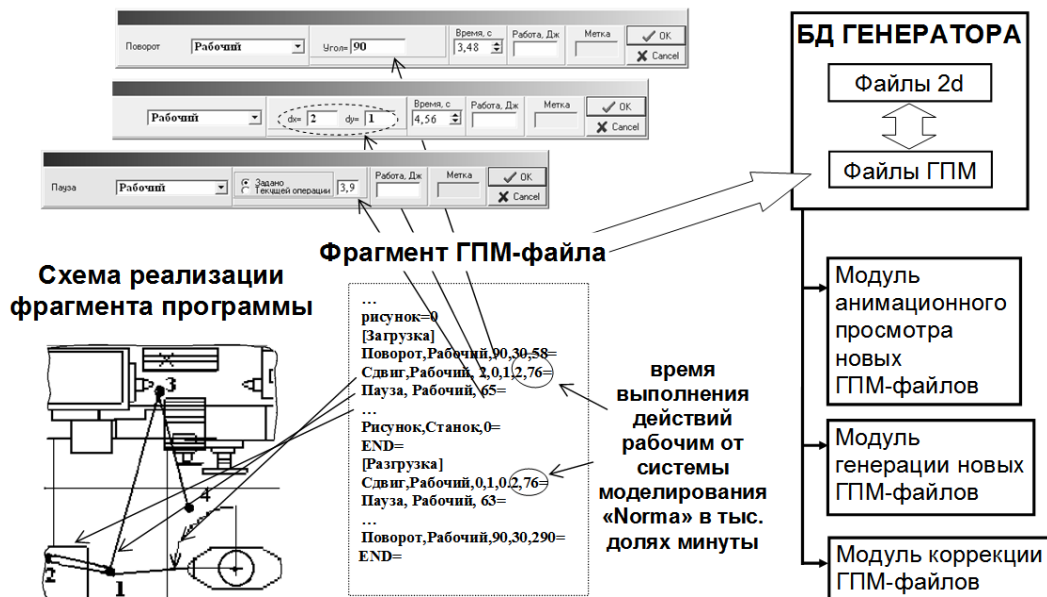


Рисунок 9 – Структура базы данных системы моделирования MPTO [2]

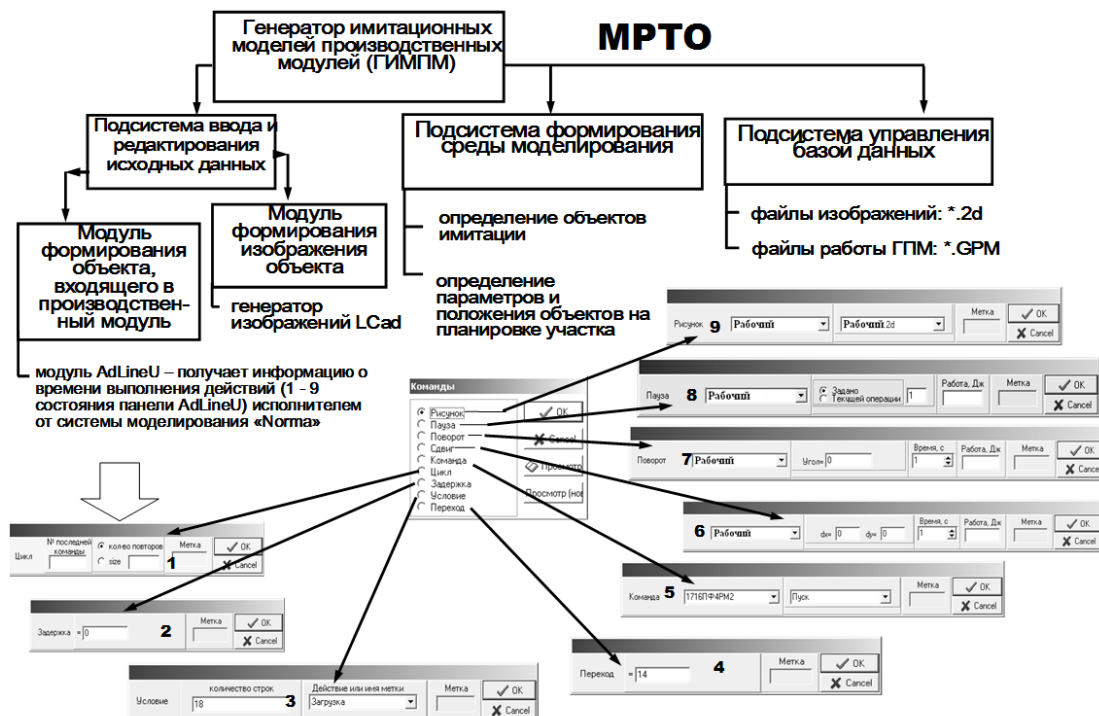


Рисунок 10 – Подсистема имитационного моделирования MPTO «NORMA»

Результаты моделирования. Имитационная модель была внедрена на производстве при разработке ремонтного участка цеха предприятия ОАО «Северсталь», Россия, г. Череповец. В ходе исследований было выполнено: нормирование машинно-ручных технологических операций, а также, энергетическая и информационная оценки действующего и модернизированного (рис. 13, б) вариантов технологических процессов.

Был проведен анализ организационно-технологической структуры производственного участка (рис. 11) и рабочих мест станочников (пример на рис. 12).

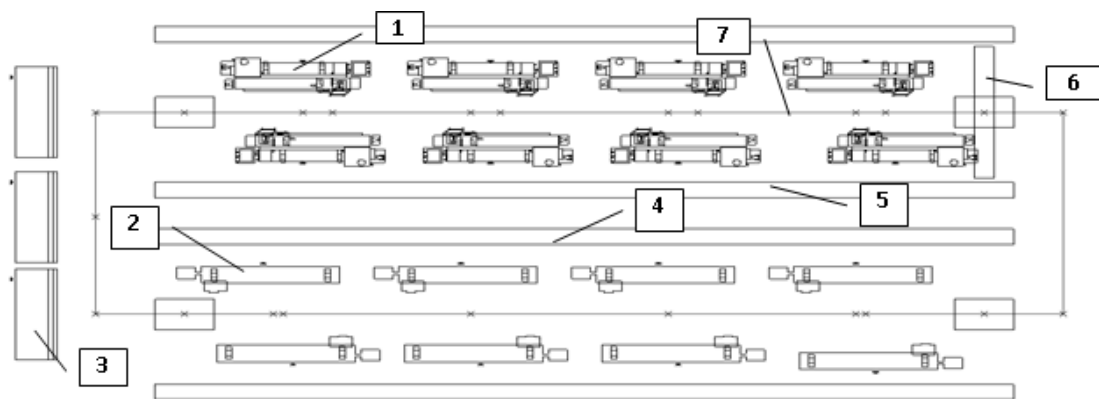


Рисунок 11 – Планировка участка ремонта валков:

- 1 – шлифовальный станок; 2 – токарный станок; 3 – склад изделий;
4, 5 – транспортный путь крана; 6 – мостовой кран

Проведено имитационное моделирование одной смены работы участка (рис. 13, а, б), в результате которого выявлена нестабильность загрузки технологических модулей и большая нагрузка на транспортную систему (рис. 13, б), что объясняется некоторой вариативностью технологии ремонта валков в зависимости от степени их износа (рис. 13, а). Это позволило адаптировать технологию восстановления валка под текущие организационно-технологические условия и получить экономический эффект в объеме 25418 гривен.

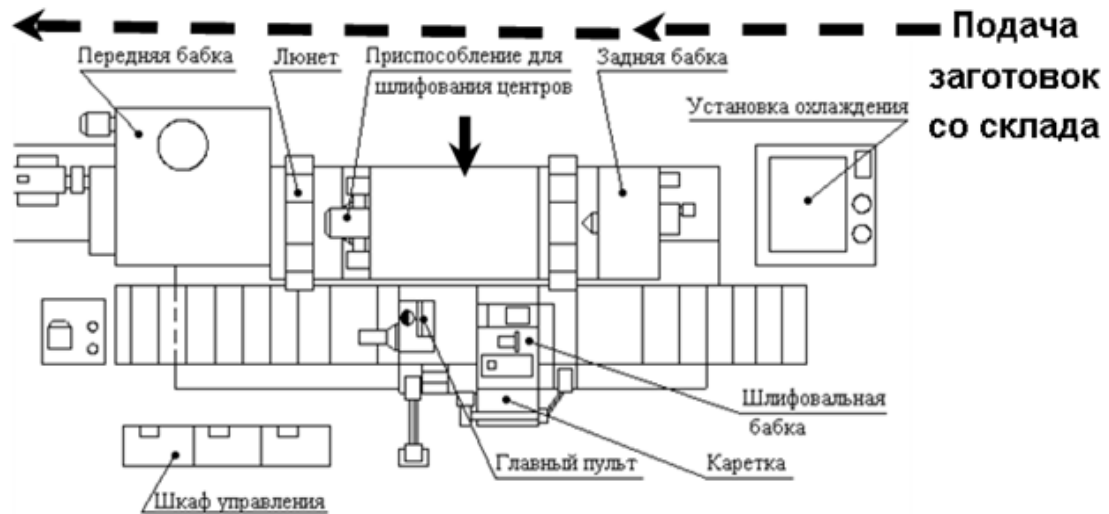
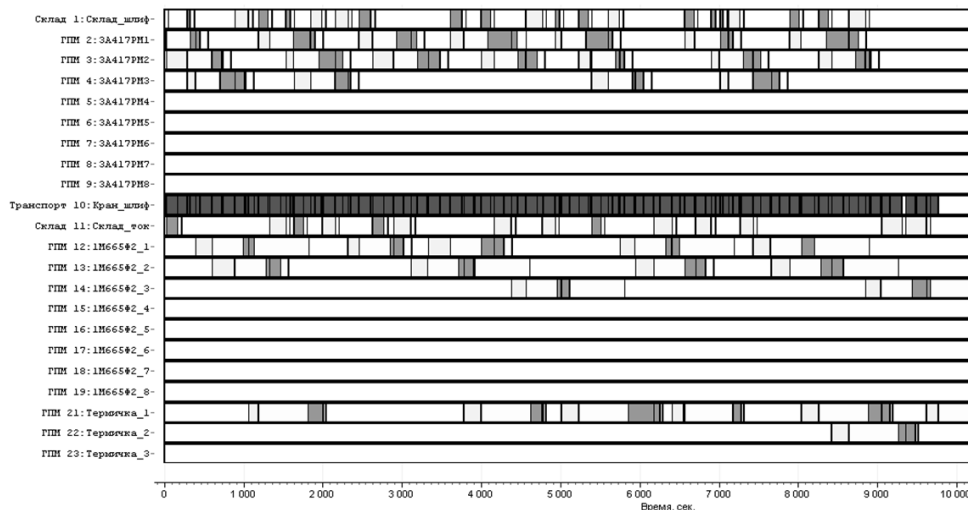
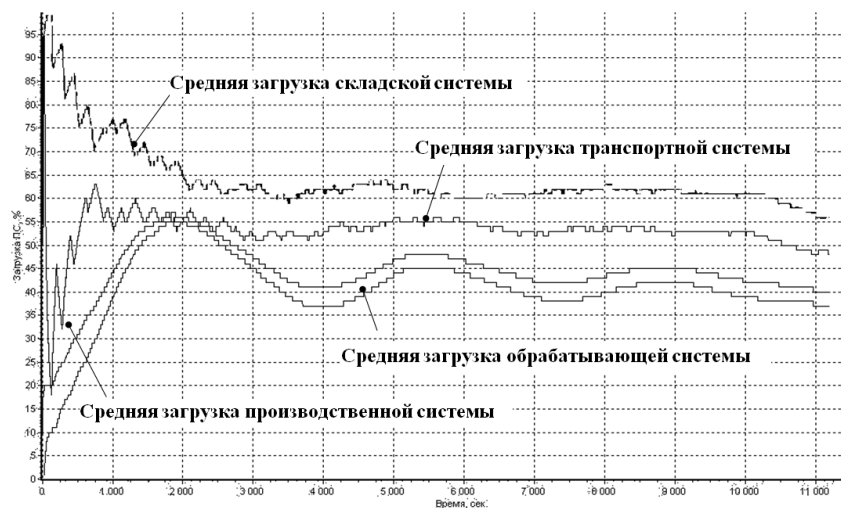


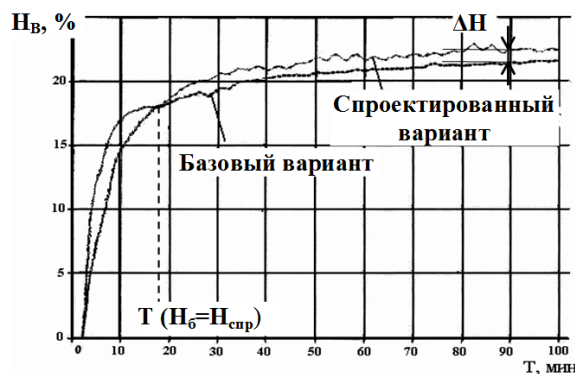
Рисунок 12 – Организация рабочего места шлифовщика



А) Циклограмма работы производственной системы (диаграмма Ганта)



Б) График средней загрузки производственной системы



где H_b – процент изменения нормы выработки со временем:

$$H_e = \frac{100 \cdot H_{ep}(T_{on}, T_{обсл})}{100 + H_{ep}(T_{on}, T_{обсл})}$$

$H_{ep}(T_{on}, T_{обсл})$ – норма времени, учитывающая время оперативной работы T_{on} , и время обслуживания $T_{обсл}$.

В) График процентного увеличения нормы выработки рабочего при выполнении МРТО

Рисунок 13 – Фрагмент результатов моделирования работы участка ремонта валков прокатного стана ЛПЦ-2 на ОАО "Северсталь" г. Череповец

Выводы.

1. Анализ проблемы сокращения непроизводительных затрат времени в МРТО показал, что основные потери связаны с неэффективным использованием ручного труда.
2. Для прогнозирования и дальнейшего понижения степени влияния человека на эффективность МРТО в системах обработки металлов резанием изучена структура взаимосвязей в ней и выполнена формализация структуры технологического перехода с участием рабочего. Это позволило, используя методы имитационного моделирования, создать математическую модель синтеза рациональных структур вспомогательных операций и переходов, отвечающих заданным организационно-техническим и технологическим условиям их выполнения.
3. Математическая модель синтеза рациональных структур МРТО нашла свою практическую реализацию в виде обобщенной методики ее структурно-параметрического синтеза, которая нашла свое отражение в разработанном и внедренном в производство пакете прикладных программ моделирования организационных и технологических характеристик МРТО «GPS».
4. В результате внедрения методики проектирования организационно-технологической структуры МРТО для формирования организационной структуры участка ремонта валков прокатного стана ЛПЦ-2 в ОАО "Северсталь" г. Череповец, Россия получен экономический эффект 25418 грн.

Список использованных источников: 1. Тимофієв Ю.В. Аналітичний підхід до оцінки часових характеристик робочого місця верстатника. / Тимофієв Ю.В., Шелковий О.М., Рузметов А.Р., Концур С.А. // Високі технології в машинобудуванні: моделювання, оптимізація, діагностика: Збірник наукових праць НТУ "ХПІ". Вип. 1(5) - Харків, 2002 р. - С. 370-376. 2. Шелковий О.М. Формат бази знань про об'єкти робітничого середовища обробки металів різанням системи проектування трудового процесу /Шелковий А.Н., Рузметов А.Р. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. - Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – №18. – С. 117-122. 3. Рузметов А.Р. Дослідження змін у тривалості проведення машинно-ручної групової технологічної операції залежно від партійності надходження деталей групи. /Рузметов А.Р. // Вісник Національного технічного

університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. - Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – №24 – С. 63-68. 4. *Шелковий О.М.* Оптимізація маршрутів просторових переміщень у ході реалізації технологічної операції /*Шелковий О.М., Рuzметов А.Р., Свидзинская М.Е., Феденюк Д.В.* //Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки" : науковий збірник – Чернігів: Черніг. держ. технол. ун-т. - 2012. - № 3 (59). – С. 203-208.

Bibliography (transliterated): Wear During Hard Machining of AISI H13 Tool Steel. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 293–300 5. Ivester RW, Whitenton E, Heigel J (2007) Measuring Chip Segmentation by High-Speed Microvideography and Comparison to Finite-Element Modelling Simulations. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 37–44 6. Fischer C (2007) Runtime and Accuracy Issues in Three Dimensional Finite Element Simulation of Machining Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 45–50. 7. Marusich TD, Usui S, Stephenson DA (2007) Finite Element Modelling of Drilling Processes with Solid and Indexable Tooling in Metals and Stack-ups. Proceedings of the 10th CIRP International 1. Timofiev Ju.V. Analitichnij pidhid do ocinki chasovih harakteristik robochogo miscja verstatnika. / Timofiev Ju.V., Shelkovij O.M., Ruzmetov A.R., Koncur S.A. // Visoki tehnologii v mashinobuduvanni: modeljuvannja, optimizacija, diagnostika: Zbirnik naukovih prac' NTU "HPI". Vip. 1(5) - Harkiv, 2002 r. - S. 370 – 376; 2. Shelkovij O.M. Format bazi znan' pro ob'ekti robotnichogo seredovishha obrobki metaliv rizannjam sistemi proektuvannja trudovogo procesu /Shelkovij A.N., Ruzmetov A.R. // Visnik Nacional'nogo tehnicnogo universitetu "Harkivs'kij politehnicnij institut". Zbirnik naukovih prac'. - Harkiv: NTU "HPI".- 2006.- №18. - S. 117-122; 3. Ruzmetov A.R. Doslidzhennja zmin u trivalosti provedennja mashinno-ruchnoї grupovoї tehnologichnoї operacii zalezno vid partionnosti nadhodzhennja detalej grupi. /Ruzmetov A.R. // Visnik Nacional'nogo tehnicnogo universitetu "Harkivs'kij politehnicnij institut". Zbirnik naukovih prac'. Tematicnij vipusk: Tehnologii v mashinobuduvanni. - Harkiv: NTU "HPI". - 2010. - №24- S. 63 – 68; 4. Shelkovij O.M. Optimizacija marshrutiv prostорових переміщень u hodi realizacii tehnologichnoї operacii /Shelkovij O.M., Ruzmetov A.R., Svidzinskaja M.E., Fedenjuk D.V. //Visnik Chernigivs'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Serija "Tehnicni nauki" : naukovij zbirnik - Chernigiv: Chernig. derzh. tehnol. un-t. - 2012. - № 3 (59). - S. 203 -208.

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ

УДК 005.8: 658.012

В.О. ВАЙСМАН, д-р техн. наук,

Е.В. КОЛЕСНИКОВА, д-р техн. наук,

Т.М. ОЛЕХ, канд. техн. наук,

А.Г. ОБОРСКАЯ, канд. техн. наук., Одесса, Україна

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА НА ОСНОВЕ МЕЖДУНАРОДНЫХ СТАНДАРТОВ

Розроблено рекомендації щодо застосування методології управління проектами в системах менеджменту якості. Показано, що основою реалізації проектів є процеси. Управління процесами і стан обладнання визначають якість продукту.

Разработаны рекомендации по применению методологии управления проектами в системах менеджмента качества. Показано, что основой реализации проектов являются процессы. Управление процессами и состояние оборудования определяют качество продукта.

Recommendations for the use of project management methodology in quality management systems. It is shown that the basis of the project is processes. Process control and condition of the equipment determine the quality of the product.

Введение. В условиях рыночной экономики общее руководство качеством трансформировалось в систему точного понимания требований потребителей для полного удовлетворения этих требований [1]. Потребители всё чаще требуют от поставщиков принятия официальных подходов к качеству, как доказательства способности его достижения [2].

Постановка проблемы. В наше время управление качеством перешло от рабочего, управляющего рабочим процессом, к менеджеру [3]. Это разделение приводит к разрыву в общении между рабочими и управляющими, между потребителями и поставщиками. Развитие новых технологий принесло дальнейшие трудности. Стала очевидной нелепость

попыток управлять качеством после того, как продукт произведён. Предотвращение брака до и во время производственного процесса снижает издержки, повышает эффективность производства. Ключевым понятием обеспечения качества стало «предотвращение» - вместо «обнаружения» отклонений [4].

Международный стандарт ISO 10002:2007 определяет качество как: «Совокупность характеристик объекта, относящихся к его способности удовлетворять установленные и предполагаемые потребности» [5]. Это подразумевает, что продукт должен соответствовать спецификации, заданной потребителем во всех отношениях и по всем параметрам [6]. Такой подход возлагает определенную ответственность на заказчика за предоставление правильных технических условий (ТУ). Нельзя утверждать, что поставщик не сумел произвести качественный продукт, если он точно соблюдал заданные заказчиком ТУ. В сущности, качество с производственной точки зрения можно определить как: соблюдение ТУ потребителя; удовлетворение требований потребителя; соответствие цели [7]. Обеспечение качества включает в себя: «Все планируемые и систематически осуществляемые виды деятельности в рамках системы качества, а также подтверждаемые (если это требуется), необходимые для создания достаточной уверенности в том, что объект будет выполнять требования к качеству» [2].

Анализ публикаций. Последние публикации по теории и практике управления качеством отражают тенденцию возрастания роли качества и применения методологии управления проектами для изготовления и поставки продукта, удовлетворяющего требования потребителя [6 - 12]. Поэтому, на практике, управление проектами, вбирая в себя методы менеджмента качества [6], фактически трансформируется в управление качеством проектов на основе концепции стандартов серии ISO 9000 [8]. Эти стандарты содержат рекомендации о том, чтобы системы менеджмента качества, сохраняя отслеживание жизненного цикла продукта, строились по принципу организации и управления процессами и их системами таким образом, чтобы качество обеспечивалось, управлялось и улучшалось [1]. В стандартах этого поколения заложена основа для тотального управления качеством (TQM) [2].

Цель исследований. Разработка подходов для применения методологии управления проектами при реализации систем менеджмента качества.

Разработка системы управления проектами СМК.

Основная философия систем менеджмента качества (СМК) состоит в содействии культуре «предотвращения» несоответствий, чтобы предвидеть и предупредить возникновение проблем до их проявления [8]. Это совершенно иной и более понятный проактивный подход к качеству, чем традиционный, когда проводился контроль конечной продукции на наличие дефектов и изделия с отклонениями от спецификации переводились в брак. Однако новый подход не исключает, а наоборот предполагает полный и всеобъемлющий контроль качества, как готовой продукции, так и всех ее составных частей на всех этапах проектирования, производства, испытания и эксплуатации.

Существенные изменения в управлении предприятиями вызваны усложнением технологий и требованиями к качеству конечных продуктов, а также задачами по сокращению цикла производства и снижению стоимости продуктов [1]. Рыночная конкуренция для предприятий определяется элементами среды, основными из которых являются технологии, ресурсы, персонал, менеджмент, рынок и проекты. Доступность и потенциальные возможности влияния на эти элементы, кроме менеджмента, почти одинаковы в пределах отдельной предметной области [2]. Внедрение проактивных подходов предоставляет потенциальные возможности улучшения результативности проектов в разы [13]. Поэтому трансформация организаций в направлении проактивного управления проектами и программами в контексте создания систем менеджмента качества является приоритетным направлением устойчивого развития предприятий [13 - 15].

Принципиальная процессная модель СМК представлена на рис. 1. Иерархия основных процессов СМК подчинена принципам цикла Шухарта-Деминга (PDCA): планирование – исполнение – измерение - улучшение. Включение в СМК подсистемы непрерывного улучшения процессов составляет основное отличие СМК от других систем управления.

Разработка и внедрения проектов, осуществляемых по стадиям жизненного цикла проекта включает такие основные процессы:

- определение потребностей и ожиданий потребителей и других заинтересованных сторон;
- установление политики и целей предприятия в области качества;
- определение процессов и ответственности, необходимых для достижения целей в области качества;
- определение и поставка ресурсов, необходимых для достижения целей в области качества;
- определение методов, позволяющих измерять результативность и эффективность каждого процесса;
- использование результатов измерений для оценки результативности и эффективности каждого процесса;
- определение методов, позволяющих предупредить несоответствия и устранить их причины;
- внедрение и использование процесса постоянного улучшения СМК.



Рисунок 1 – Принципиальная модель СМК

При построении системы управления проектами согласно ISO–9001 исходят из того, что все работы по созданию, поставке и обслуживанию продукции у потребителя представлены в виде процессов с входом (заготовка, ресурс), непосредственно процессом (комплекс работ по преобразованию заготовки или ресурса с возрастанием ее ценности) и выходом (результат процесса — продукт).

Каждый рабочий предприятия обслуживает определенный процесс. В свою очередь, каждый процесс для успешного функционирования должен иметь своего хозяина, отвечающего за эффективность процесса и имеющего определенные полномочия по воздействию на процесс, не только в части управления его параметрами, но и ремонта, технического обслуживания и поддержания в исправном состоянии. В роли хозяина процесса, в зависимости от объема и вида операций, может выступать рабочий, мастер или начальник цеха, начальник отдела, ведущий специалист.

На рис. 2. приведена базовая модель процесса [2]. В общем случае под процессом понимается преобразование входов в выходы. Этот же подход использует и тотальное управление качеством (Total quality management — TQM) — необходимо управление процессами, а не только их конечными продуктами. Несомненно, что хозяин процесса должен быть определенным образом мотивирован к тому, чтобы процесс был устойчивым и эффективным.

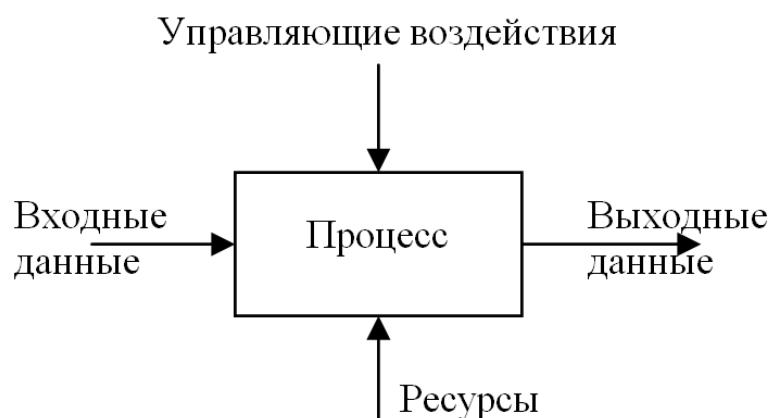


Рисунок 2 - Базовая модель процесса

Управление качеством осуществляется путем соблюдения нормативов технической документации (ТД). Для выпуска качественной продукции предприятие должно определить, внедрить и поддерживать функционирование этих процессов, а также скоординировать и увязать их. Это есть концептуальная основа стандартов серии ISO 9000. При этом одним из важнейших в СМК является процесс регистрации, оценки и дальнейшего использования продукта, не соответствующего установленным требованиям (бракованным), с целью предотвращения его использования (рис. 3).



Рисунок 3 – Управление не соответствующим продуктом

Браком в производстве считаются изделия, заготовки, детали и сборочные единицы, которые изготовлены с отклонениями от требований ТД. В зависимости от характера дефектов, брак бывает исправимый и неисправимый (окончательный). Исправимым браком считаются детали, сборочные единицы и изделия, которые после исправления могут быть использованы по прямому назначению, а исправление технически возможно и экономически целесообразно.

Управление процессами для управления качеством осуществляется в двух аспектах: управление структурой сети процессов, построением самих процессов, в которых имеет место поток продукции, скоординированный во времени и на рабочих местах таким образом, чтобы продукция изготавливалась требуемого качества и в запланированные сроки; управление качеством продукции в процессе. Основным выходом процесса управления продуктом, который не соответствует установленным требованиям, является совершенствование СМК направленное на предотвращение брака.

Процессы, как и продукция, оцениваются показателями качества [6].

Согласно стандартам ISO 9000 процессы должны быть документированы: чертеж, технологический процесс, инструкция по охране труда, методика контроля, операционного хранения и перевозки, сертификат качества поставщика исходных материалов. Должны быть графики проверки и обслуживания оборудования.

Процедуры должны выполняться: проверяется качество исходных материалов; контролируется последовательность технологических операций; организуется в соответствии с требованием технологического процесса рабочее место; задействованное технологическое оборудование проверяется по утвержденным методикам; контроль и результаты фиксируются.

Выводы. Показано, что основой реализации проектов СМК являются процессы. Управление процессами и контроль состояния оборудования определяют качество продукта. При этом одним из основных процессов в СМК является управление продуктом, не соответствующим установленным требованиям.

Список использованных источников: 1. Вайсман, В. А. Методологические основы управления качеством: факторы, параметры, измерение, оценка / В. А. Вайсман, В. Д. Гогунский, В. М. Тонконогий // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – 2012. – Вип. 7. – С. 160-165. 2. ДСТУ ISO 9001:2009 Системи управління якістю. Вимоги. (ISO 9001:2008, IDT). 3. Интегрированные генеративные технологии : учеб. пособие [Текст] / А.И. Грабченко, Ю.Н. Внуков, В.Л. Доброскок [и др.] ; под ред. А.И. Грабченко. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – 396 с. 4. Каору И. Японские методы управления качеством. – М. : Экономика, 1988. – 192 с. 5. ДСТУ ISO 10002:2007 Управління якістю. Задоволеність замовників. (ISO 10002:2004, IDT).

6. Гогунский, В.Д. Практические задачи измерения качества в проектах / В. Д. Гогунский, Т. М. Олех, А. Г. Оборская // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. - № 1 (11/55). – С. 6-8. 7. Бушуев, С.Д. Ценностный подход в управлении развитием сложных систем / С.Д. Бушуев, Д.А. Харитонов // Управління розвитком складних систем.– 2010 - № 1. – С. 10-15. 8. Вайсман, В.О. Сучасна концепція проектно-орієнтованого командного управління підприємством / В.О. Вайсман, К.В. Колесникова, В.В. Натальчишин // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. пр. – № 8. – НТУ «ХПІ», 2013. - С. 246-253. 9. Колесникова, Е.В. Построение автоматизированной системы тренинга персонала дуговой сталеплавильной печи / Е.В. Колесникова, В.А. Вайсман, В.М. Тонконогий, А.С. Лопаков // Сучасні технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. – № 7. – НТУ «ХПІ», 2012. - С. 304-311. 10. Белоущицкий, А.А. Управление проблемами в методологии проектно-векторного управления образовательными средами / А.А. Белоущицкий // Управління розвитком складних систем.– 2012. - № 9. – С. 104-107. 11. Вайсман, В. Нова методологія створення інноваційного розвитку проектно-керованих організацій / В. Вайсман, В. Гогунський // Економіст. – 2011. - № 8 (298). – С. 11-13. 12. Яковенко, В.Д. Прогнозування стану системи керування якістю навчального закладу / В.Д. Яковенко, В.Д. Гогунський // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2009. - № 2. - С. 50-57. 13. Руденко, С. В. Сетевые процессы управления проектами в контексте отображения состояний проекта / С.В. Руденко, Е. В. Колесникова, В. И. Бондарь // Проблемы техники. – 2012. – № 4. – С. 61-67. 14. Колесникова, Е.В. Моделирование слабо структурированных систем проектного управления / Е.В. Колесникова // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 2013. - № 3 (42). – С. 127-131. 15. Вайсман, В. О. Система стандартів підприємства для управління знаннями в проектно керованій організації / В. О. Вайсман, С. О. Величко, В. Д. Гогунський // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 2011. – № 1(35).– С. 256-261.

Bibliography (transliterated): 1. Vaysman, V. A. Metodologicheskiye osnovy upravleniya kachestvom: faktory, parametry, izmerenie, otsenka / V. A. Vaysman, V. D. Gogunsky, V. M. Tonkonogy // Suchasni tehnologiyi v mashinobuduvanni: zb.– 2012. – Vip. 7. - S. 160 – 165. 2. DSTU ISO 9001:2009 Sistemy upravlinnja yakistju. Vimogy. (ISO 9001:2008, IDT). 3. Integririvannyye generativnyye tehnologiyi : ucheb. posobie / A.I. Grabchenko, Ju.N. Vnukov, V. L. Dobroskok [i dr.] ; pod. red. A. I. Grabchenko. – Kharkov, : NTU «KhPI», 2011. – 396 p. 4. Kaoru I. Yaponskie metodyi upravleniya kachestvom. – M. : Ekonomika, 1988. – 192 s. 5. DSTU ISO 10002:2007 Sistemy upravlinnja yakistju. Zadovolennist zamovnykiv. (ISO 10002: 2004, IDT). 6. Gogunsky, V. D. Prakticheskie zadachi izmereniya kachestva v proektah / V. D. Gogunsky, T. M. Olekh, A. G. Oborska // Vost.-Evrop. zhurnal peredovyih tehnologiy. – 2012. - № 1 (11/55). – S. 6 – 8. 7. Bushuev, S. D. Tsennostnyiy podhod v upravlenii razvitiem slozhnyih sistem / S. D. Bushuev, D. A. Haritonov // Upravlinnya rozvitkom skladnih sistem.– 2010 - № 1. – S. 10 – 15. 8. Vaysman, V. O.

Suchasna kontsepsiya proektno-oriyntovanogo komandnogo upravlinnya pidpriyemstvom / V. O. Vaysman, K. V. Kolesnikova, V. V. Natalchishin // Suchasni tehnologiyi v mashinobuduvanni: zb. nauk. pr. – № 8. – NTU «KhPI», 2013. – S. 246 – 253.

9. Kolesnikova, E. V. Postroenie avtomatizirovannoy sistemy treninga personala dugovoy stalepla-vilnoy pechi / E. V. Kolesnikova, V. A. Vaysman, V. M. Tonkonogy, A. S. Lopakov // Suchasni tehnologiyi v mashinobuduvanni : zb. nauk. pr. – № 7. – NTU «KhPI», 2012. – S. 304 – 311.

10. Beloschitskiy, A. A. Upravlenie problemami v metodologii proektno-vektornogo upravleniya obrazovatelnyimi sredami / A. A. Beloschitskiy // Upravlinnya rozvitkom skladnih sistem.– 2012. – № 9. – S. 104 – 107.

11. Vaysman, V. Nova metodologiya stvorenniya Innovatsiynogo rozvitku proektno-kerovanih organizatsiy / V. Vaysman, V. Gogunsky // Ekonomist. – 2011. – № 8 (298). – S. 11 – 13.

12. Yakovenko, V. D. Prognozuvannya stanu sistemi keruvannya yakistyu navchalnogo zakladu / V. D. Yakovenko, V. D. Gogunsky // Sistemni doslidzhennya ta informatsiyni tehnolo-giyi. – 2009. – № 2. – S. 50 – 57.

13. Rudenko, S. V. Setevye protsessy upravleniya proektami v kontekste otobrazheniya sostoyaniy proekta / S. V. Rudenko, E. V. Kolesnikova, V. I. Bondar // Problemi tehniki. – 2012. – № 4. – S. 61 – 67.

14. Kolesnikova, E. V. Modelirovanie slabo strukturirovannyih sistem proektnogo upravleniya / E. V. Kolesnikova // Tr. Odes. politehn. un-ta. – 2013. – № 3(42). – S. 127 – 131.

15. Vaysman, V. O. Sistema standartiv pidprijemstva dlya upravlinnya znannyami v proektno kerovaniy organizatsiyi / V. O. Vaysman, S. O. Velichko, V. D. Gogunsky // Tr. Odes. politehn. un-ta. – 2011. – № 1(35).– S. 256 – 261.

УДК 658.56:621.715

В.О. ЗАЛОГА, д-р техн. наук,
О.В. ІВЧЕНКО, канд. техн. наук,
О.О. ЗАЛОГА, Суми, Україна

СИСТЕМА ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЯКІСТЬ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ ПІДГОТОВКИ МАШИНОБУДІВНОГО ПІДПРИЄМСТВА В УМОВАХ ЗАКУПІВЛІ МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

Встановлено, що однією з тенденцій розвитку сучасного машинобудівного підприємства є так званий аутсорсінг бізнес-процесів, а саме, передача функцій інструментальної підготовки виробництва, в частині проектування та виробництва інструменту й оснащення стороннім організаціям. Розроблено система факторів, що впливають на якість інструментальної підготовки машинобудівного підприємства (ІПМП) в умовах закупівлі металорізального інструменту, які пропонується поділити на чотири рівні (групи факторів). Запропоновано одну групу – економічні фактори – використовувати в якості критеріїв оптимізації робіт з ІПМП, а три інші (технічні характеристики виробництва, якість інструменту) – в якості обмежуючих факторів.

Установлено, что одной из тенденций развития современного машиностроительного предприятия является так называемый аутсорсинг бизнес-процессов, а именно, передача функций инструментальной подготовки производства, в части проектирования и производства инструмента и оснастки сторонним организациям. Разработана система факторов, влияющих на качество инструментальной подготовки машиностроительного предприятия (ИПМП) в условиях закупки металлорежущего инструмента, которые предлагается разделить на четыре уровня (группы факторов). Предложено одну группу – экономические факторы – использовать в качестве критериев оптимизации работ по ИПМП, а три другие (технические характеристики производства, техническое задание, качество инструмента) – в качестве ограничивающих факторов.

It was established that one of the trends of modern machine-building enterprise is the so-called outsourcing of business processes, namely, the transfer function of instrumental pre-production, in terms of design and manufacturing tools and equipment to third parties. A system of factors affecting the quality of tool preparing of machine-building enterprise in the

conditions of purchase cutting tools which are offered divided into four levels (groups of factors). The first group – economic factors – used as criteria of optimization work on tool preparing engineering company, and three others (manufacturing specifications, technical requirements, the quality of the instrument) – as limiting factors.

Вступ

Машинобудівна промисловість відіграє велику роль у розвитку продуктивних сил країни, у роботі з прискорення науково-технічного прогресу та підвищення ефективності національної економіки. Машинобудування в нашій країні є органічною складовою майже кожного напрямку промислової діяльності України. Структурно машинобудівну галузь держави можна представити у вигляді машинобудівного комплексу, що представлено на рис. 1. Це одна з територіально найбільш поширених галузей господарства України, основним призначенням якої є виготовлення деталей до них та збирання з них вузлів та виробів у відповідній галузі (легкій та харчовій промисловостях, верстатно- та приладобудуванні, транспортному та важкому машинобудуванні тощо), що відповідають сучасним вимогам до високоефективної конкурентоспроможної продукції. Основу машинобудування становить матеріалообробка. Найбільш поширеними оброблюваними матеріалами у теперішній час є традиційні метали і їхні сплави, в першу чергу конструкційні сталі й чавуни, для яких достатньо добре розроблені та перевірені на практиці умови й режими оброблення.

За останні роки значно збільшились номенклатура та питома вага серед оброблюваних різними технологічними способами (литтям, механічною обробкою (тиском та різанням), зварюванням, термічною обробкою та ін.) матеріалів (металів і їх сплавів з особливими властивостями (нових нержавіючих, високотвердих та високоміцних, жароміцних тощо), а також різного роду неметалічних матеріалів, у т.ч. композиційних) для значної більшості з яких треба виконувати процедуру визначення оптимальних умов оброблення у зв'язку з їх відсутністю у вигляді затверджених (офіційних) нормативів, рекомендацій, інструкцій та ін., що потребує, як правило, значних людських, матеріальних і часових витрат на проведення відповідних досліджень.



Рисунок 1 – Машинобудівний комплекс України

Сучасні машинобудівні підприємства у своїй діяльності використовують велику номенклатуру оснащення та інструментів [1], яка постійно розширюється у зв'язку з необхідністю обробки «нових» для відповідної галузі конструкційних (оброблюваних) матеріалів. За оцінками фахівців, частка витрат на придбання й виготовлення технологічного оснащення в собівартості продукції підприємства традиційно складає до 30 %, запаси інструментів і пристосувань у грошовому виразі досягають до 40 % загальної суми оборотних коштів підприємства; в інструментальних цехах і ділянках машинобудівної промисловості зосереджено до 20 % устаткування, до 10 % робочих від числа зайнятих в основному виробництві; проектування і виготовлення комплексу технологічного оснащення по трудомісткості складає до 80%; по тривалості – 90 % від загальних витрат на технологічну підготовку виробництва нових виробів машинобудування [1].

Таким чином, виготовлення продукції або надання послуг машинобудівним підприємством у відповідній галузі народного господарства України потребує використання певного інструменту,

оснащення, пристроїв, які визначені технологією виготовлення відповідних виробів. Більш того, в умовах швидкозмінних вимог споживачів особливою метою будь-якого машинобудівного підприємства стає виконання стратегії «бути швидше», що залежить від гнучкості виробництва, тривалості впровадження нової продукції у виробництво та ін. За останні роки значно збільшилась кількість (питома вага) багатомоноклатурних виробництв, як правило, з індивідуальним та дрібносерійним типами організації роботи. Основними особливостями цих підприємств в частині організації їх інструментальної підготовки є те, що виготовлення оснащення та інструментів «своїми» силами, тобто шляхом їхнього вироблення в інструментальних та інших цехах, навіть у тих випадках, коли вони вже є, стає настільки нерентабельним, що може не тільки значно знижувати конкурентну спроможність продукції всього виробництва, але супроводжуватись його банкрутством. Одним з ефективних шляхів вирішення цієї проблеми є організація інструментальної підготовки виробництва зі значним збільшення питомої ваги покупних інструментів та технологічного оснащення, які виготовляються спеціалізованими підприємствами (фірмами), на великий жаль, як правило, іноземними (Sandvik, Kennametal, Härtel, Gühring та ін.), що мають в Україні у достатній мірі розвинену дилерську мережу. У цій мережі досить часто має місце ситуація, коли пропозиції з одного й того самого інструменту або технологічного пристрою можуть суттєво різнитися як за ціною, так й за термінами постачання. Тому розробка принципів організації інструментальної підготовки виробництва машинобудівного підприємства в частині закупки різального інструменту та технологічного оснащення є задачею актуальною й своєчасною. Враховуючи ту обставину, що обробка різанням серед інших видів формообразуючих процесів є переважаючою (у загальній структурі обладнання близько 98 % займають металорізальні верстати (78 % для лезової й 20 % для абразивної) та лише 2 % обладнання для електрохімічної, електрофізичної, комбінованої та інших видів обробки [2]), метою цієї роботи є розробка основних принципів організації інструментальної підготовки виробництва машинобудівного підприємства в частині закупки металорізального інструменту на основі визначення

факторів, що впливають на якість цієї підготовки шляхом використання одного з семи «простих статистичних інструментів якості» – причино-наслідкової діаграми.

Класифікація металорізального інструменту та дослідження структури світового ринку його використання

Розмаїтість номенклатури покупних різальних інструментів сучасного машинобудівного підприємства зумовлює необхідність його класифікації, що є передумовою раціональної організації інструментальної підготовки виробництва – забезпечення обліку, зберігання й видачі інструменту (оснащення), а також організації його закупівлі в потрібній кількості й в необхідні для виробництва терміни.

У нашому випадку під класифікацією пропонується розуміти розподіл усіх інструментів та технологічного оснащення, що застосовуються на машинобудівному підприємстві, на певні групи за найголовнішими ознаками: характером використання; місцем у виробничому процесі та призначенням.

За характером використання розрізняють:

- інструмент й оснащення загального застосування – універсальний стандартизований інструмент для виконання відповідних груп операцій на різних ділянках або підприємствах в цілому, параметри якого визначені вимогами відповідних нормативних документів і який виготовляється на спеціалізованих підприємствах (заводах);
- інструмент й оснащення, які призначені для виконання певних операцій або виготовлення конкретних деталей – спеціальний інструмент або спеціальне оснащення (штампи, прес-форми тощо), що проектується й виготовляються силами інструментального господарства самого підприємства.

За місцем використання у виробничому процесі розрізняють:

- інструмент першого порядку, що використовується для виготовлення основної продукції підприємства, тобто в основному виробництві;

- інструмент другого порядку, що використовується для виготовлення інструменту першого порядку.

За призначенням все інструментальне оснащення на підприємстві звичайно можна поділити на такі підкласи: 1) різальний інструмент; 2) абразивний інструмент; 3) вимірювальний інструмент; 4) слюсарно-монтажний інструмент; 5) кувальний інструмент; 6) допоміжний інструмент; 7) штампи; 8) пристрої; 9) моделі, кокілі, прес-форми; 10) інструмент різний (десятична система класифікації, що має від п'яти до семи ступенів) [3].

Розглянемо проблеми, пов'язані з організацією інструментальної підготовки виробництва тільки у частині різальних інструментів. Основні напрямки розвитку обробки різанням пов'язані з її інтенсифікацією за рахунок новітніх і синтезу існуючих методів обробки. Основна тенденція зміщення технологічних показників в розмірній обробці у зв'язку з підвищенням вимог до продукції, що виготовляється, в напрямку більш високих ступеня точності й якості обробленої поверхні змінює у теперішній час співвідношення між окремими видами обробки: зменшується обсяг традиційних методів токарної та фрезерної обробки за рахунок впровадження як абразивної, тобто збільшується частка, наприклад, шліфування, а також лезової обробки інструментами зі зносостійкими покриттями, а також із надтвердих матеріалів (синтетичного алмазу, кубічного нітриду бору та ін.), які дозволяють суттєво підвищувати продуктивність оброблення та якість обробленої поверхні за рахунок використання високошвидкісного та надшвидкісного видів різання, наприклад, для фрезерування використовувати швидкості різання до 100 м / с і подачі до 14000 мм / хв. [4].

У теперішній час постійно йде удосконалення конструкцій виробів, технологій та матеріалів. З появою нових матеріалів, а також конструкцій інструментів, виникає проблема їх раціонального використання. Існуючі нормативні бази для призначення режимів різання, проектування інструментів та верстатів, а також оцінювання якості інструментів є вже недостатньо придатними, що обумовлюється, як вже вбуло відмічено, наявністю більш високих швидкостей обробки, застосуванням при виготовленні деталей основного виробництва новітніх конструкційних

матеріалів, а також виготовлення лезового інструменту із нових інструментальних матеріалів, у т.ч. з різноманітними зносостійкими покриттями.

За результатами статистичних досліджень структури світового ринку металорізального інструменту [5] можна стверджувати, що на машинобудівних підприємствах більше 50 % різальних інструментів використовується для токарної (різці), фрезерної (фрези) та свердлильної (свердла) видів оброблення (рис. 2).



Рисунок 2 – Структура використання інструментів за видами обробки

В той же час, питома вага покупного інструменту для цих видів оброблення в системі інструментального забезпечення сучасного підприємства на сьогодні вже становить 80–85 % [1].

Дослідження роботи національних машинобудівних підприємств вказує на те, що ще на початку XXI століття вони, в основному, використовували інструмент вітчизняного виробництва та країн ближнього зарубіжжя (Росія, Білорусія, країни Прибалтики та ін.). Проте на вітчизняному ринку з'являється тенденція віддавання переваги закупівлі інструментів у виробників з інших країн. Зростає пропозиція високоякісного різального інструменту з Німеччини, Франції, Швеції та ін., а також інструменту з Китаю та країн Південно-Східної Азії який достатньо часто, на жаль, має низьку та середню якість. Разом з тим, сучасний споживач металорізального інструменту ще недостатньо приділяє уваги оцінюванню якості покупного інструменту, тим більше ще до його придбання. В першу чергу це можна пояснити майже повною

відсутністю багатьох прийнятних методологічних аспектів і підходів щодо оцінювання якості запропонованих різним виробниками та їхніми представниками (дилерами) різальних інструментів, які б відповідали, в першу чергу, критерію «ціна + якість», а також вимогам і умовам реального виробництва, для якого пропонується потрібний інструмент: реальні особливості оброблюваного матеріалу, стан матеріалообробного обладнання (верстату), ступінь його автоматизації (наприклад, універсальний без або з ЧПК, багатокоординатний обробний центр тощо), ступінь діагностування стану обробної системи взагалі та інструменту зокрема безпосередньо у процесі оброблення, можливість коригування режиму різання у процесі оброблення та ін. Ці обставини посилюється ще й тим, що характерною особливістю сучасного ринку металорізального інструменту є наявність безлічі хоча й відомих, але відносно невеликих фірм і великої кількості діючих в різних країнах дрібних фірм, які становлять більше 38 % обсягу ринку [6]. Але за даними рейтингів на світовому ринку різальних інструментів спостерігається гнітюча перевага трьох фірм – Sandvik, Kennametal, Iscar [7]. Їх позиція й високий рейтинг обумовлені не тільки відносно великими обсягами виробництва інструментів і технологічного оснащення, але наявністю сертифікатів якості на них та постійним їхнім вдосконаленням у відповідності зі зміною вимог саме у сфері де використовуються новітні матеріали та технології.

Система факторів для оцінювання якості різальних інструментів

Якість інструментальної підготовки машинобудівного підприємства в умовах закупівлі металорізального інструменту залежить від численних факторів, між якими існує відношення типу причина – наслідок (результат). Структури або характер цих багатofакторних відносин можливо визначити завдяки систематичним спостереженнями. Для цього у роботі пропонується застосувати один з «семи простих статистичних інструментів якості» – причинно-наслідкову діаграму, структуру якої досить докладно описано в [1] та наведено на рис. 3.

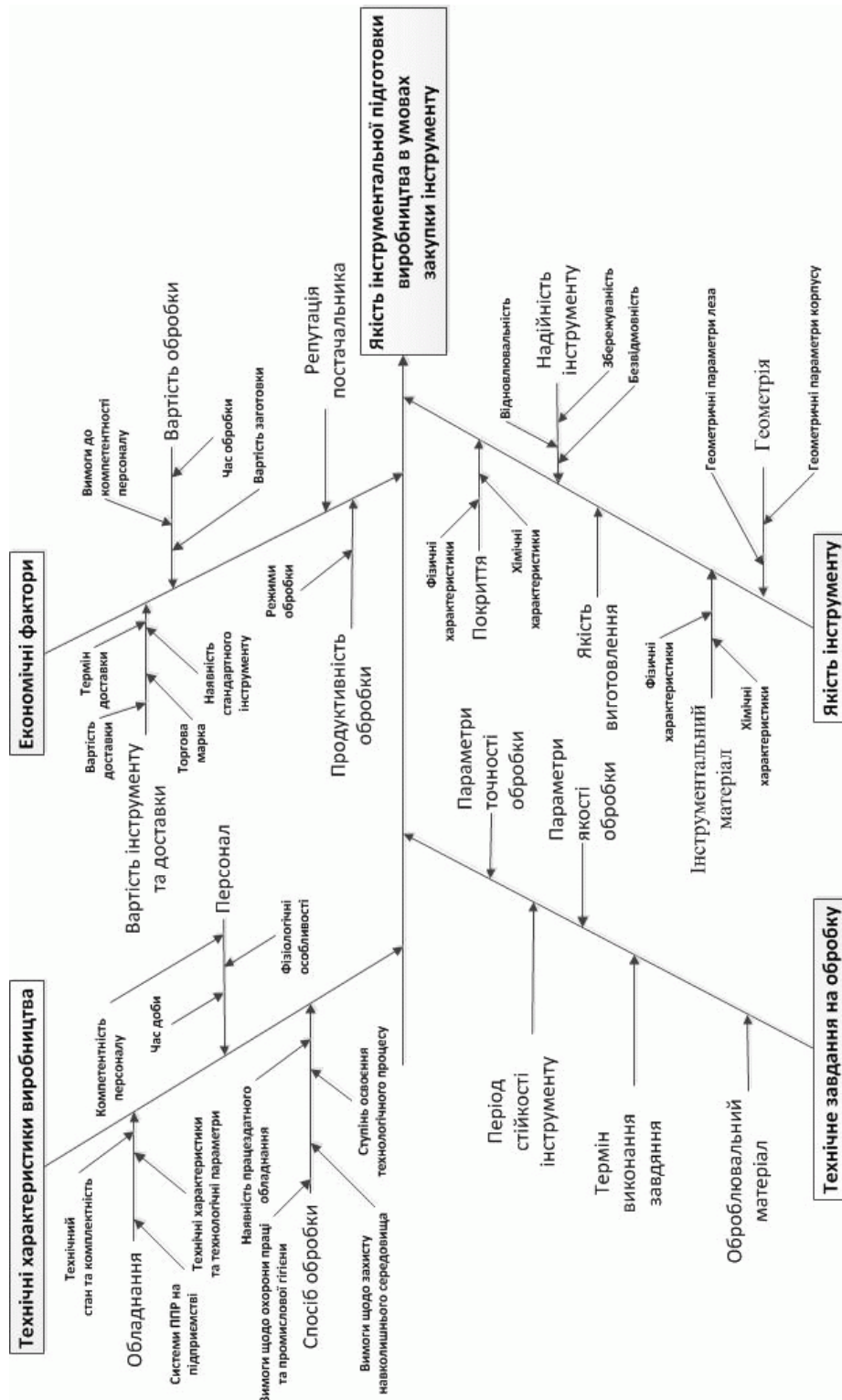


Рисунок 3 – Система факторів, що впливають на якість інструментальної підготовки машинобудівного підприємства в умовах закупівлі металорізального інструменту

У відповідності з прийнятою структурою розроблена система факторів, що впливають на якість інструментальної підготовки машинобудівного підприємства в умовах закупівлі металорізального інструменту.

У розробленій системі (рис. 3) запропоновано перший рівень градації зазначених факторів (основні гілки діаграми) поділити на чотири рівні (групи факторів), причому одну групу (*економічні фактори*) пропонується використовувати в якості критеріїв оптимізації робіт з інструментальної підготовки машинобудівного підприємства, а три (*технічні характеристики виробництва, технічне завдання, якість інструменту*) можуть виступати в якості обмежуючих факторів.

- **Технічні характеристики виробництва** – є лімітованими (обмежуючими) факторами пов'язаними з можливостями конкретного машинобудівного підприємства, що купує металорізальний інструмент (технічні характеристики наявного на підприємстві обладнання, у т.ч. його стан; ступінь освоєння технології та способи обробки, що використовуються на підприємстві; компетентність персоналу підприємства та ін.).

- **Технічне завдання** – характеризують вхідні данні для конкретного технічного завдання, яке необхідно реалізувати при інструментальній підготовці виробництва (вид оброблювального матеріалу, вимоги до точності й якості виробу, стійкості інструменту та ін.).

- **Якість інструменту** – характеризують показники, що обумовлюють якість інструменту, який застосовується для вирішення конкретного завдання, що повинна реалізувати інструментальна підготовка виробництва (надійність інструменту, конструктивні та геометричні (геометрія леза) параметри інструменту, умови його експлуатації та ін.).

- **Економічні фактори** – фактори, що обумовлюють затрати на інструментальну підготовку виробництва при вирішенні конкретного технічного завдання (бажані вартості інструменту та його доставки, вартість обробки, пріоритети підприємства щодо призначення раціональних режимів обробки та ін.).

Висновки

1. На машинобудівних підприємствах, де виробляють складну й трудомістку продукцію, номенклатура інструменту, що застосовується, досягає десятків тисяч найменувань. Для забезпечення виробництва необхідними компонентами на підприємствах, як правило, вже існує інструментальна підготовка виробництва, яка повинна забезпечувати у задані терміни основне виробництво інструментом і оснащенням встановленого рівня якості з найменшими витратами як за рахунок виготовлення інструментів та оснащення безпосередньо на своєму виробництві, так і за рахунок використання покупного інструментального оснащення. Показано, що за останні часи питома вага покупного оснащення постійно зростає.

2. Результати проведеного дослідження діяльності машинобудівних підприємств вказують на те, що однією з тенденцій розвитку сучасного машинобудівного підприємства є так званий аутсорсінг бізнес-процесів, а саме, передача функцій інструментальної підготовки виробництва, в частині проектування та виробництва інструменту та оснащення шляхом купівлі, наприклад, металорізального інструменту, стороннім організаціям вже займає до 85 % об'єму інструментів та оснащення, що використовується у машинобудівній галузі.

3. Статистичні данні щодо виготовлення та розповсюдження металорізальних інструментів вказують на відносно велику кількість організацій, що виготовляють та розповсюджують відносно велику номенклатуру інструментів та оснащення і надають різноманітний спектр послуг стосовно інструментальної підготовки виробництва. В той же час, аналіз показує, що серед лезового інструменту, займають більше 50 % ринку металорізального інструменту, що купують машинобудівні підприємства, займають тільки різці, фрези та свердла.

4. Розроблена система факторів, що впливають на якість інструментальної підготовки машинобудівного підприємства в умовах закупівлі металорізального інструменту, які пропонується поділити на чотири рівні (групи факторів). Запропоновано одну групу – економічні фактори – використовувати в якості критеріїв оптимізації робіт з

інструментальної підготовки машинобудівного підприємства, а три інші (технічні характеристики виробництва, технічне завдання, якість інструменту) – в якості обмежуючих факторів.

5. Показано, що на вітчизняних підприємствах майже не проводиться оцінювання якості металорізального інструменту, що купується у постачальників. Це пов'язано, насамперед, з:

- відсутністю нормалізованих (стандартизованих) методик визначення показників їх якості (мається на увазі металорізального інструменту, а не якості послуг постачальників), які б були признані як з боку покупця, так й з боку постачальника (виробника цього інструменту);
- важкістю однозначного визначення показників, що регламентують якість металорізального покупного інструменту, які б у повній мірі відповідали вимогам до нього в залежності від специфічних особливостей підприємства (конкретний оброблюваний матеріал, тип і стан обладнання, кваліфікація персоналу тощо).

На сьогодні рішення щодо вибору інструменту та оснащення приймаються, як правило, на основі суб'єктивної думки спеціалістів підприємства або за результатами експериментів, які, в першому випадку, часто призводить до великої ймовірності помилок, а в другому – до великих економічних витрат часу та фінансових ресурсів підприємства.

6. Показано, що створення нових та вдосконалення наявних засобів і методів оцінювання якості різального інструменту та їх нормативного забезпечення є актуальним науково-прикладним завданням, вирішення якого дозволить підвищити продуктивність і надійність технологічної системи, значно скоротити терміни технологічної підготовки виробництва та запуску нових виробів, забезпечити конкурентоспроможність продукції вітчизняного машинобудування.

Список використаних джерел: 1. Івченко, О. В. Управління якістю інструментальної підготовки виробництва багатомасштабного машинобудівного підприємства: дис... канд. техн. наук, спец.: 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення / О. В. Івченко. – К. : Київський нац. ун-т технологій та дизайну, 2009. – 278 с. 2. Студопедія // [Електронний ресурс] – Режим доступу. – URL: <http://studopedia.org/5-13403.html> (дата звернення: 21.03.2015). 3. Швець, С.В. Металорізальні інструменти: навч. посіб. – Суми : СумДУ, 2007. – 185 с. 4. Основы теории резания материалов: учебник / Н. П. Мазур, Ю. Н. Внуков, А. И. Грабченко и др.;

Под общ. ред.: Н.П. Мазура, А.И. Грабченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Х. : НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с. 5. Адлер, Ю. П. Качество и рынок, или Как организация настраивается на обеспечение требований потребителей. – Поставщик и потребитель. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2000. – 128 с. 6. Рынок режущего инструмента // [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: http://www.instrstan.com/obzor/obzor_151.html (дата звернення: 11.02.2015). 7. Крылов, Е.Г. Автоматизированная система выбора технологических решений для оборудования с ЧПУ / Е. Г. Крылов, Ю. П. Сердобинцев, А. Б. Мишкевич, В. В. Литвинцева // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8 (135). – Волгоград.: ВолгГТУ, 2014. – Вып. 11. – С. 67–69.

Bibliography (transliterated): 1. Ivchenko, O. V. Upravlinnja jakistju instrumental'noї pidgotovki virobництва bagatonomenklaturnogo mashinobudivnogo pidpriemstva: dis... kand. tehn. nauk, spec.: 05.01.02 – standartizacija, sertifikacija ta metrologichne zabezpečennja / O. V. Ivchenko. – К. : Kiїvs'kij nac. un-t tehnologij ta dizajnu, 2009. – 278 s. 2. StudopediJa // [Elektronnij resurs] – Rezhim dostupu. – URL: <http://studopedia.org/5-13403.html> (data zvernennja: 21.03.2015). 3. Shvec', S. V. Metalorizal'ni instrumenti: navch. posib. – Sumi : SumDU, 2007. – 185 s. 4. Osnovy teorii rezanija materialov: uchebnik / N. P. Mazur, Ju. N. Vnukov, A. I. Grabchenko i dr. ; Pod obshh. red.: N.P. Mazura, A.I. Grabchenko. – 2-e izd., pererab. i dop. – H. : NTU «HPI», 2013. – 534 s. 5. Adler, Ju. P. Kachestvo i rynok, ili Kak organizacija nastraivaetsja na obespechenie trebovanij potrebitelej. – Postavshhik i potrebitel'. – M.: RIA «Standarty i kachestvo», 2000. – 128 s. 6. Rynok rezhushhego instrumenta // [Elektronnij resurs] – Rezhim dostupu. – URL: http://www.instrstan.com/obzor/obzor_151.html (data zvernennja: 11.02.2015). 7. Krylov, E. G. Avtomatizirovannaja sistema vybora tehnologicheskikh reshenij dlja oborudovanija s ChPU / E. G. Krylov, Ju. P. Serdobincev, A. B. Mishkevich, V. V. Litvinceva // Izvestija VolgGTU : mezhvuz. sb. nauch. st. № 8 (135). – Volgograd.: VolgGTU, 2014. – Vyp. 11. – S. 67–69.

УДК: 621.833-558-412:620.22

Д.В. КРИВОРУЧКО д-р техн. наук,
И.О. ОСАДЧИЙ, Сумы, Украина.

КАЧЕСТВО ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС НА ОСНОВЕ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Зубчасті колеса є основним елементом зубчастої передачі. Зубчасті передачі та механізми досить поширені в машинобудуванні. Поява нових композиційних матеріалів дає поштовх до підвищення їх точності, несучої здатності зубчастих передач і зниження маси. Аналіз літератури виявив тільки окремі дослідження в цій області, присвячені стабілізації розмірів ЗК в результаті додавання в пластичні маси волокон склопластику при цьому знижується деформації після видалення з форми. Велика увага в процесі виготовлення зубчастих коліс повинна приділятися якості і точності продукції, її відповідності необхідним технічним стандартам. Метою цієї роботи є оцінка показників якості зубчастих коліс (ЗК) виготовлених із застосуванням волокнистих полімерних композиційних матеріалів (ВПКМ). Результати були отримані за допомогою вимірів зубчастих коліс спеціальними зубовимірвальними приладами. Зубчасті колеса з ВПКМ, дозволяють вирішити завдання забезпечення геометричної точності при формуванні і забезпечити можливість фінішної обробки у разі отримання коліс високого ступеня точності. У роботі показано, що ступінь точності ЗК, виконаних з вуглепластика, знаходиться на рівні ЗК з інших неметалічних матеріалів, при застосуванні процесу формування, проте тільки у вуглепластикових ЗК є великий резерв підвищення точності за рахунок застосування фінішних методів обробки та оптимізації схем уклади волокон, які неможливо застосувати для інших неметалічних матеріалів.

Зубчатые колеса являются основным элементом зубчатой передачи. Зубчатые передачи и механизмы, широко распространенные в машиностроении. Появление новых композиционных материалов дает толчок к повышению их точности, нагрузочной способности зубчатых передач и снижению массы. Анализ литературы выявил только отдельные исследования в этой области, посвященные стабилизации размеров ЗК в результате добавления в пластические массы волокон стеклопластика при этом снижается деформации после удаления формы. Большое внимание в процессе изготовления зубчатых колес должно уделяться качеству и точности выпускаемой

© Д.В. Криворучко, И.О. Осадчий, 2015

продукции, ее соответствию требуемым техническим стандартам. Целью настоящей работы является оценка показателей качества зубчатых колес (ЗК) изготовленных с применением волокнистых полимерных композиционных материалов (ВПКМ). Результаты были получены при помощи измерений зубчатых колес специальными зубоизмерительными приборами. Зубчатые колеса из ВПКМ, позволяют решить задачу обеспечения геометрической точности при формовке и обеспечить возможность финишной обработки в случае получения колес высокой степени точности. В работе показано, что степень точности ЗК, выполненных из углепластика, находится на уровне ЗК из других неметаллических материалов, при применении процесса формовки, однако только у углепластиковых ЗК есть большой резерв повышения точности за счет применения финишных методов обработки и оптимизации схем укладки волокон, которые неприменимы для других неметаллических материалов.

The wheel gears are the primary element in the gear. Gears and mechanisms are widespread in manufacturing engineering. The occurrence of new composite materials gives rise to increase accuracy, load capacity and reduce weight of gears. Literature review revealed only individual studies on the stabilization of the size of the wheel gears through adding in plastics fiberglass, thus reducing the strain after removing the mold. Much attention in the manufacturing process of gears should be given to the quality and accuracy of the parts in accordance with the standards. The aim of this paper is to assess the quality rating of fiber reinforced plastic (FRP) wheel gears. Results were obtained by measuring gears with special gear-measuring devices. Usage of FRP in the manufacture process of wheel gears production solves the task of ensuring geometrical accuracy during molding, and enable finishing wheels in the case of a high degree of accuracy. It was established that the degree of accuracy of FRP wheel gears, is comparable with one for other non-metallic materials after forming process, but only FRP wheel gears has a large reserve for increasing accuracy through the use of mechanical polishing and optimization of fiber lay up schemes, which are inapplicable for other nonmetallic materials.

1 Введение

В современных условиях конкурентоспособность продукции определяется двумя основными показателями: качеством и быстротой реакции на ее изменение за счет освоения новых технологий. Особое место в машиностроении занимает процесс обработки зубчатых колес связанный с высокой сложностью и трудоемкостью. Привычные технологии не обеспечивают достаточную эффективность, так как

необходимо проводить многоэтапную зубообработку. Решение задачи обеспечения качества и сокращения технологического цикла может быть найдено при условии применения альтернативных методов получения заготовки и обработки деталей. Одним из перспективных направлений в машиностроение является приближение по форме и размерам к готовой детали. Высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, низкая теплопроводность, делают углепластики лучшим материалом для проектирования и создания новых материалов и конструкций из них. Возможность сочетать в одном материале высокую прочность и химическую инертность, а также вибро-, звукопоглощение обуславливает выбор именно этого материала для изготовления конструкций различных редукторов и других механизмов с высоким ускорением и скоростью перемещения. Е. [Hakimian](#), изучая точность ЗК рассматривал такие три фактора как параметры впрыска, коробление и усадку, при помощи внедрения стекловолокна. Результатом стало минимизация значения коробления (0,0051 мм) и усадки (2,28%) [1]. М. Kurokawa, включил в технологический процесс изготовления зубчатых колес из ВПКМ операцию нанесения покрытия на поверхность зуба, что способствует снижению сил трения и повышению степени точности. Наибольший эффект показал поли-тетра-фтор-этилен [2]. G. Kapil в своей статье анализирует оптимизацию параметров микро-геометрии общее отклонение профиля F_a и накапливается отклонение шага F_p и благодаря применению метода «Вох–Behnken» точность получаемых шестерен повышалась с 7 до 5.

Таким образом, качество зубчатых колес из ВПКМ зависит от конструкции заготовки и методов финишной обработки. Поэтому **целью настоящей работы** является оценка показателей качества зубчатых колес изготовленных с применением волокнистых полимерных композиционных материалов.

2 Технология получения заготовок

Процесс формовки зубчатых колес из композиционных материалов весьма специфичен. Определяющее влияние на качество готового

продукта имеет способ армирования (направление армирования). На основе расчета поля напряжений разработана схема укладки волокон, которая предполагает расчет направления укладки волокон в теле зуба и сил, действующих в зубчатом зацеплении. В связи с техническими трудностями, сопровождающими проведение натурного эксперимента, была предложена программа поискового модельного эксперимента.

Для повышения адекватности конечно-элементной модели заготовки зубчатого колеса были выполнены испытания стандартных образцов углепластика, которые показали положительный результат при испытаниях на разрыв.

Таблица 1 – Свойства применяемых материалов

Материал свойства	Флубон	ПОМ	Полиамид	3D печать	Углепластик вдоль волокон	Углепластик поперек волокон
Е, ГПа	1,2	2,6	8,0	2.0	130	10
$\sigma_{\text{в}}$, МПа	26	140	160	-	1200	35

В результате проведения модельного эксперимента установлены рациональные схемы укладки волокон углеплеты: расположение волокна вдоль оси зуба. Ниже представлен рисунок иллюстрирующий компьютерное моделирование напряжений в теле зуба и предложенную схему укладки. Приведена фотография отформованной заготовки из углепластика с расположением волокон вдоль оси зуба.

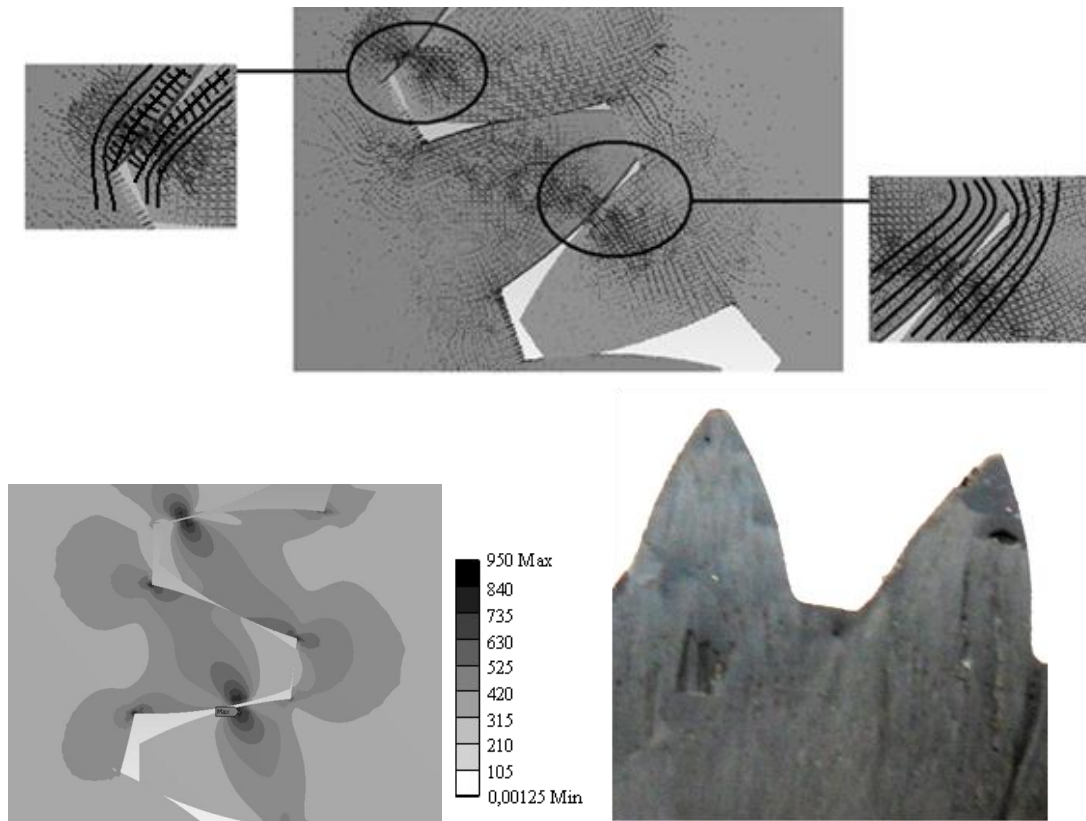


Рисунок – Поле максимальных главных напряжений в зубьях колес прямозубой цилиндрической передачи и предлагаемая схема укладки волокон

3 Параметры точности

Для каждой степени точности зубчатых колес и передач устанавливаются нормы: кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев зубчатых колес в передаче. Для определения колебания длинны общей нормали применялся нормалемер БВ-5045-В, 6-ь измерений проводились по периметру зубчатого венца. Шероховатость измерялась при помощи профилометра П-283. Предельное отклонение шага было определено при помощи шагомера БВ-5070, после настройки размера концевыми мерами проводились измерение.

Таблица 2 – Показатели точности зубчатых колес $m=2$, $z=30$, $W=21,3$

Материал	Метод формования	Шероховатость R_a , мкм	Предельное отклонение шага F_{Pt} , мкм	Колебание длины общей нормали F_s , мкм	Степень точности по ГОСТ 1643-81 DIN 3962
Флубон (HB 58)	Зубодолбежная	1,18	30	20	8
ПОМ (HB 177)	Зубодолбежная	1.45	50	70	9
Полиамид (HB 134)	Зубодолбежная	1,82	30	20	8
3D печать (HB 114)	печать	9,46	140	80	10
Углеродистый пластик (хаотичные волокна) (HB 180)	формовка	1,6	110	60	9
Углеродистый пластик (хаотичные волокна) (HB 144)	Зубодолбежная	1,7	16	20	8
Углеродистый пластик (упорядоченные волокна) (HB 219)	формовка	1,4	80	70	9
Углеродистый пластик (упорядоченные волокна) (HB 219)	Зубошлифовка	0,8	10	10	6

Точность изготовления зубчатых колес и передач задается степенью точности, а требования к боковому зазору - видом сопряжения по нормам бокового зазора. Проведя измерения и анализ обработанных материалов

было определено величину отклонения длинны общей нормали, отклонение шага, шероховатость поверхности и среднюю длину общей нормали. Наибольшую погрешность по всем критериям показала 3D печать, высокая шероховатость и низкая геометрическая точность обусловлены послойной структурой материала. Флубон ПОМ и Полиамид показали схожую шероховатость и отклонение шага, но большее в сравнении с углепластиком колебание длины общей нормали, что обусловлено высоким уровнем пластической деформации.

Касательно углепластиков наихудшие параметры показали – формовка и зубодолбежная операция это связано с неточностью изготовления формы и изменением геометрических параметров при термообработке углепластиков также хаотичностью расположения волокон. Шероховатость находится в одном диапазоне как после формовки, так и после лезвийной обработки углепластиков. Однако при абразивной обработке шероховатость повысилась до $R_a = 0,8$ что является высоким показателем для неметаллических материалов. Также положительно на шероховатость влияет упорядоченное расположение волокон в теле зуба. При срезании слоя припуска не образуются дефекты на эвольвентной поверхности зуба.

Попытки применения заготовок с предварительно оформленными зубьями не получили широкого распространения в связи с возможностью повышения точности на 1-2 степени. При получении металлической заготовки степень точности равна 10-12, чего недостаточно для применения только финишной обработки, что сводит на нет все преимущества от экономии материала заготовки. Применение формованных углепластиковых заготовок 8-9 степени точности позволяет сразу проводить финишную обработку и получать зубчатые колеса 6-7 степени точности.

4 Выводы

В ходе исследований было показано, что степень точности при изготовлении зубчатых колес из ВПКМ значительно выше, чем у колес изготовленных из других неметаллических материалов. Поэтому технологический процесс изготовления зубчатых колес из ВПКМ должен

включать финишные методы обработки для получения ЗК 6-7 степени точности.

Это может быть достигнуто за счет формовки упорядоченных волокон ЗК для получения точной заготовки 8-9 степень точности и механической обработки поверхностей зубьев для обеспечения высокой геометрической точности в одном технологическом процессе. Это позволит при оптимизации схемы укладки армирующих волокон учесть не только необходимость обеспечения их ориентации в направлении наибольших нагрузок, но и минимизировать их повреждения при последующей обработке резанием в случае получения колес высокой степени точности.

В работе показано, что степень точности ЗК, выполненных из углепластика, находится на уровне ЗК из других неметаллических материалов, при применении процесса формовки, однако только у углепластиковых ЗК есть большой резерв повышения точности за счет применения финишных методов обработки и оптимизации схем укладки волокон, которые неприменимы для других неметаллических материалов.

Список использованных источников: 1. [Hakimian E.](#) Analysis of warpage and shrinkage properties of injection-molded micro gears polymer composites using numerical simulations assisted by the Taguchi method / E. [Hakimian](#), Y. // [Materials & Design](#). – 2012. – Vol. 42. – pp.62-71. 2. Kurokawa M. Performance of plastic gear made of carbon fiber reinforced poly-ether-ether-ketone / M. Kurokawa, Y. Uchiyama // [Tribology International](#). – 1999. – Vol. 32. – pp.491–497. 3. Kapil G. Analysis and optimization of micro-geometry of miniature spur gears manufactured by wire electric discharge machining / G. Kapil, J Neelesh // [Precision Engineering](#). – 2014. - Vol. 38. – pp.728–737.

Bibliography (transliterated): 1. Hakimian E. Analysis of warpage and shrinkage properties of injection-molded micro gears polymer composites using numerical simulations assisted by the Taguchi method / E. Hakimian, Y. // [Materials & Design](#). – 2012. – Vol. 42. – pp.62-71. 2. Kurokawa M. Performance of plastic gear made of carbon fiber reinforced poly-ether-ether-ketone / M. Kurokawa, Y. Uchiyama // [Tribology International](#). – 1999. – Vol. 32. – pp.491–497. 3. Kapil G. Analysis and optimization of micro-geometry of miniature spur gears manufactured by wire electric discharge machining / G. Kapil, J Neelesh // [Precision Engineering](#). – 2014. - Vol. 38. – pp.728–737.

УДК 620.179.118

Н. В. ЛИЩЕНКО, канд. техн. наук,
В.П. ЛАРШИН, д-р техн. наук, Одесса, Украина
Ф.С. САБИРОВ, д-р техн. наук, Москва, Россия

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ И ВОЛНИСТОСТИ ФРЕЗЕРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Розглянуто відомі показники якості поверхні та особливості застосування частотного підходу до їх визначення відповідно до нової концепції єдиного виміру різних видів геометричних параметрів якості обробленої поверхні – відхилення форми, хвилястості і шорсткості поверхні. Відзначається, що інструментом поділу нерівностей поверхні в інтервалі їх зміни «від мікро до макро» є фільтрація цифрового сигналу профілограми, отриманого за допомогою комп'ютеризованої апаратури. Наведено покрокова методика та приклади цифрової обробки профілограми при експериментальному дослідженні фрезерованою поверхні.

Рассмотрены известные показатели качества поверхности и особенности применения частотного подхода к их определению в соответствии с новой концепцией единого измерения разных видов геометрических параметров качества обработанной поверхности – отклонения формы, волнистости и шероховатости поверхности. Отмечается, что инструментом разделения неровностей поверхности в интервале их изменения «от микро до макро» является фильтрация цифрового сигнала профилограммы, полученного при помощи компьютеризированной аппаратуры. Приведена пошаговая методика и примеры цифровой обработки профилограммы при экспериментальном исследовании фрезерованной поверхности.

The known parameters of surface quality and frequency approach application features to their definition in accordance with the new concept of unified measurement of different kinds of geometrical parameters of surface quality, such as form deviation, waviness and roughness, are examined. It is noted that the separation tool of surface irregularities in the range of change "from micro to macro" is to filter the profilogram digital signal obtained using computerized equipment. Step by step technique and examples of profilogram digital processing in the experimental study of the milled surface are given.

1. Постановка проблемы. Качество обработанной поверхности характеризуется параметрами её микро- и макрогеометрии и наряду с показателями точности обработки определяет эксплуатационные свойства

деталей и узлов машин. Возникающие в упругой системе станка вибрации также оказывают влияние на шероховатость и волнистость обработанной поверхности. Одновременное измерение и спектральный анализ колебаний в упругой системе станка и частотного состава профилограммы обработанной поверхности позволяет находить взаимосвязь между ними и на этой основе диагностировать технологическую систему лезвийной и абразивной обработки на станках с ЧПУ. В этой связи применение частотного подхода к анализу указанных физических явлений разной природы (вибраций при обработке и частотного состава профилограммы обработанной поверхности) относится к числу актуальных задач в технологии машиностроения.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Вопросам «безопорного» (skidless) измерения и анализа шероховатости, волнистости и отклонения формы поверхности на измерительной станции с ЧПУ типа HOMMEL TESTER T8000C, работающей в соответствии с европейскими и американскими стандартами, в отечественной литературе не уделено должного внимания. Имеющиеся исследования [1, 2, 3] не соответствуют современному состоянию вопроса. Методики измерения, основанные на частотном методе и цифровой фильтрации, также не отражены или отражены частично [4].

3. Цель исследования заключается в апробировании методики измерения параметров шероховатости и волнистости поверхности в соответствии с зарубежными стандартами при экспериментальном исследовании плоского фрезерования образцов на станке мод. 500V/5 (обрабатывающий центр с ЧПУ).

4. Материалы исследований. В процессе резания на металлорежущих станках обрабатываемая заготовка является замыкающим звеном в упругой технологической системе резания и образует с режущим инструментом кинематическую пару. Относительное движение детали и режущего инструмента определяет постоянную и переменную составляющие выполняемого при обработке размера. Постоянная составляющая размера и допускаемое отклонение от него указываются на операционном эскизе заготовки или на чертеже детали. Переменная составляющая размера характеризует качество обработанной поверхности

и рассматривается на уровне макро- и микроотклонений, под которыми понимают отклонение формы обрабатываемой поверхности от требуемой по чертежу и шероховатость поверхности. Переходную зону между макро- и микроотклонениями называют волнистостью обработанной поверхности. Например, при плоском фрезеровании концевой фрезой отклонением формы является отклонение от плоскостности, которое можно обнаружить в пределах обработанной поверхности при условии, что там же находится измерительная база для контроля этого отклонения. Непредусмотренный при настройке станка наклон обработанной плоскости по отношению к горизонтальной плоскости может быть вызван погрешностью установки заготовки. Этот наклон характеризует погрешность взаимного расположения поверхностей. Эта погрешность относится не к обработанной поверхности (плоскости), а к заготовке в целом. Поэтому её не включают в показатели качества поверхности, если особо не оговорена необходимость получения горизонтально расположенной плоскости.

Аналогичные рассуждения можно привести применительно к обработке цилиндрической поверхности, когда отклонением формы цилиндрической поверхности считают отклонения от круглости в отдельно взятых поперечных сечениях заготовки (измерительная база находится на контуре контролируемого сечения). В то же время конусность относится не только к погрешности формы заготовки, но также к погрешности формы цилиндрической поверхности (конус вместо цилиндра), так как для выявления конусности можно найти измерительную базу на обработанной цилиндрической поверхности.

Представление формируемого при механической обработке размера в виде суммы постоянной и переменной составляющей этого размера соответствует частотному подходу в анализе микро – и макронеровностей, позволяющему путём фильтрации сигнала, характеризующего выполняемый размер, выделять параметры точности (постоянная составляющая) и качества (переменная составляющая) обработанной поверхности. Тот же самый частотный подход принято использовать при анализе вибраций в замкнутой упругой системе металлорежущего станка. Это позволяет с единых позиций рассматривать в частотной области разные по физической природе явления: макро – и микрогеометрию

обработанной поверхности, и динамический колебательный процесс (вибрации) в упругой системе металлорежущего станка, в котором выполняемый размер является замыкающим звеном замкнутой размерной цепи. Это позволяет установить (в одной и той же частотной области) детерминированные и корреляционные связи между указанными явлениями разной физической природы, происходящими в одно и то же время при обработке заготовке на станке, для того чтобы в последующем управлять процессом обработки. Это управление может быть основано на использовании встроенной системы технологической вибродиагностики, позволяющей по анализу возникающих в упругой системе виброакустических колебаний обеспечивать требуемую макро- и микрогеометрию обработанной поверхности, включая её волнистость. Или не допускать нежелательных частотных составляющих в спектре макро- и микронеровностей обработанной поверхности.

Таким образом, критерием разграничения показателей качества поверхности от других показателей точности обработки, относящимся к заготовке, является факт наличия измерительной базы на обработанной поверхности, что уже само по себе характеризует колебательную (по отношению к имеющейся измерительной базе) природу показателей макро- микрогеометрии. В этой связи в последние годы в соответствующих европейских (DIN) и американских (ASME) стандартах принята концепция «частотного подхода» к анализу и измерению отдельных составляющих макро- и микрогеометрии обработанных поверхностей, включая переходную зону – волнистость поверхности. В зарубежной литературе эта концепция получила название «концепция пертометра» или Perthometer concept. Она нашла отражение в указанных зарубежных стандартах. Сущность концепции заключается в рассмотрении абстрактного «элемента профиля», который может быть найден при анализе шероховатости, волнистости и отклонении формы поверхности, соответственно на высокой, средней и низкой частоте, которая обратно пропорциональна периоду (шагу) повторения этого элемента. Программное обеспечение пертометра работает в операционной системе Windows, что делает доступным для обработки сигналов все стандартные приложения Windows.

В этой связи вводится понятие периодического (регулярного) и аperiodического (нерегулярного) профиля, что применительно к шероховатости поверхности показано на рис. 1.

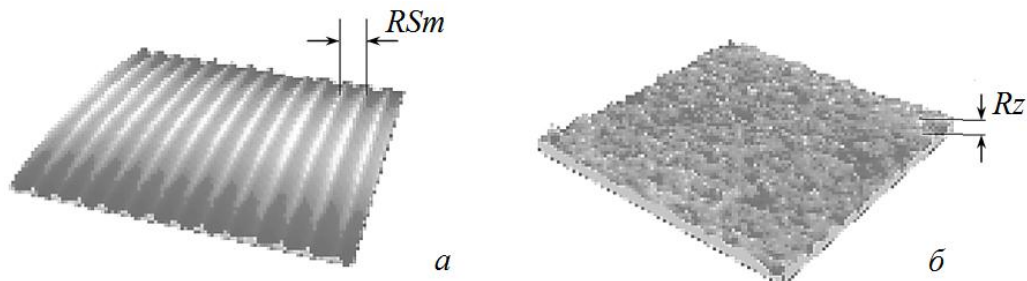


Рисунок 1 – Периодический (а) и аperiodический (б) профиль в топографии шероховатости обработанной поверхности [1]:
 RSm и Rz шаговый и высотный параметры профиля

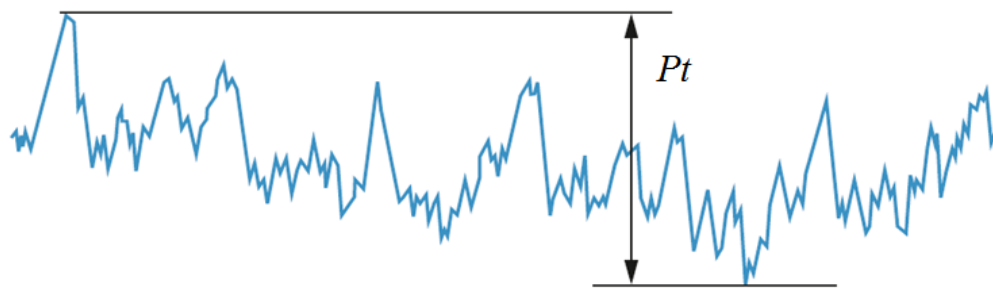
Сущность идеи частотного разделения составляющих, характеризующих разные группы показателей качества обработанной поверхности (шероховатость, волнистость, отклонение формы), заключается в последовательной цифровой фильтрации сигнала, выработанного датчиком безопорным щупа (skidless probe) в процессе измерения (рис. 2).

Особенностью частотного подхода в оценке качества обработанной поверхности заключается в том, что измерения составляющих отклонения профиля производятся после соответствующей частотной фильтрации. Например, так оценивают показанные на рис. 2 максимальные отклонения соответствующих профилей (Pt , Wt и Rt) на интервале измерения ln . Поэтому, всякие искажения этих и других составляющих не только по амплитуде, но и по фазе, приведут к ложной их оценке. Наиболее трудоёмкой частью проектирования соответствующих частотных фильтров является обеспечение фазовой коррекции (phase correcting) составляющих после их прохождения через фильтр. Это вызвано тем, что известные сегодня структуры цифровых КИХ (конечная импульсная характеристика) и БИХ (бесконечная импульсная характеристика) фильтров в полосе пропускаемых частот изменяют фазу составляющих гармоник, соответственно, линейно (КИХ фильтр) и нелинейно (БИХ фильтр). Это вызывает так называемую групповую (группа гармоник в полосе пропускаемых фильтром частот) задержку выходного сигнала

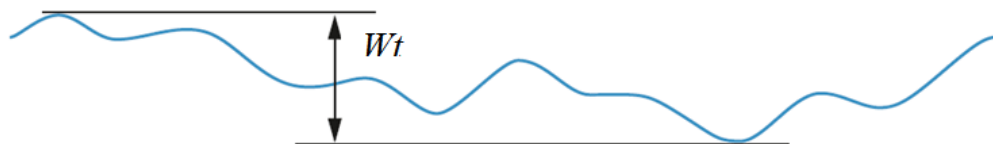
фильтра, т.е. искажение его выходного сигнала. Например, если выходной сигнал характеризует волнистость, то волна на выходе фильтра искажена как по форме, так и по положению в системе координат обработанной поверхности. В ряде случаев (показано ниже) применение удачной математической процедуры сглаживания (smoothing) профилограммы для выявления волнистости поверхности может дать более высокую точность оценки параметров волны, приближенную к результатам измерения данных на выходе фазокорректированного фильтра (phase correct filter).

В стандарте DIN EN ISO 4288, в соответствии с которым работает станция T8000, предусмотрено величину отсечки шага, равную базовой длине, выбирать с учётом вида измеряемого профиля: периодический профиль или аperiodический (табл. 1).

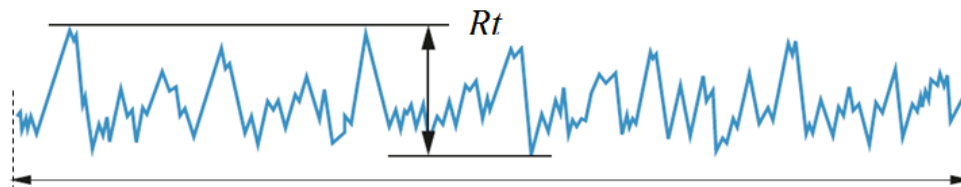
Нефильтрованный P -профиль



Отфильтрованный W -профиль



Отфильтрованный R -профиль



Интервал измерения ln

Рисунок 2 – Выделение отфильтрованного профиля волнистости (W -профиль) и шероховатости (R -профиль) из первичного (prime profile) нефильтрованного профиля (P -профиль) [1]

Таблица 1 – Выбор длины трассирования lt , базовой длины lr и длины оценки ln по стандарту DIN EN ISO 4288

Периодический профиль	Апериодический профиль		Отсечка шага	Базовая длина/длина оценки	Длина трассирования
RSm , мм	Rz , мкм	Ra , мкм	λ_s , мм	lr / ln	lt , мм
0,013 - 0,04	0,025 - 0,1	0,006-0,02	0,08	0,08/0,4	0,48
0,04 - 0,13	0,1 - 0,5	0,02 - 0,1	0,25	0,25/1,25	1,5
0,13 - 0,4	0,5 - 10	0,1 - 2	0,8	0,8/4	4,8
0,4 - 1,3	10 - 50	2 - 10	2,5	2,5/12,5	15
1,3 - 4,0	50 - 200	10 - 80	8	8/40	48

Сначала определяют длину трассирования lt и длину оценки ln , которая меньше lt на длину начального и конечного участков траектории перемещения щупа. Начальный и конечный участки исключаются из рассмотрения, так как на этих участках щуп движется с переменной скоростью и возможны ошибки измерения. Для получения волнограммы поверхности, т.е. низкочастотной составляющей неровностей первичного профиля, в современных измерительных станциях используют фазокорректированный фильтр низкой частоты (W -профиль на рис. 2). Далее из первичного нефильтрованного профиля (P -профиль на рис. 2) для каждой точки интервала измерения ln (абсцисса графика на рис. 2) находят разность ординат P -профиля и W -профиля, которая характеризует шероховатость обработанной поверхности (R -профиль на рис. 2). Если найденные при автоматическом измерении значения параметров Rz и Ra находятся в соответствующих интервалах их изменения (табл. 1), то измерения считается законченным. В противном случае необходимо изменить базовую длину при той же длине трассирования и длине измерения и снова определить параметры Rz и Ra .

Для исследования влияния режимов фрезерования на геометрические неровности профиля и для установления связи их с вибрациями в технологической системе проведены экспериментальные исследования процесса плоского фрезерования на станке мод. 500V/5 (обрабатывающий центр с ЧПУ Siemens 840D). В качестве образцов для фрезерования

использованы призматические заготовки 65 х 50 х 30 мм из стали марки Ст3. Противоположные боковые плоские грани этих образцов последовательно фрезеровали концевой фрезой диаметром 18 мм с числом зубьев 4 из быстрорежущей стали Р6М5 (рис. 3).

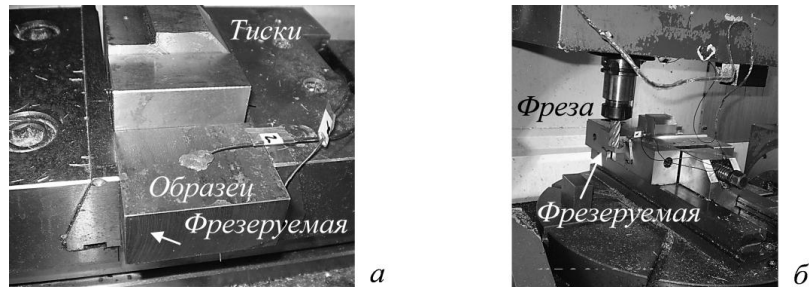


Рисунок 3 – Установка призматического образца в тисках (а) с закрепленными на нём датчиками виброускорения AP2019 и технологическая наладка (б) для станка мод. 500V/5

Измерение профиля обработанной поверхности производили с помощью станции контроля Hommel Tester 8000 фирмы JENOPTIK (далее Т8000) в режиме измерения шероховатости и волнистости (рис. 4).

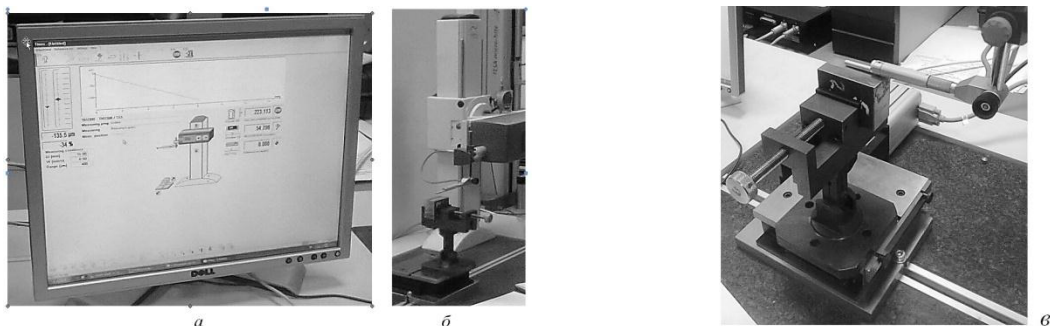


Рисунок 4 – Настройка станции Т8000 на измерение шероховатости после установки в тиски призматического образца № 5.2:

а – схема настройки (на мониторе прибора) при управлении перемещением контактного щупа; б – вертикальное перемещение контактного щупа перед касанием с образцом № 5.2; в – исходное положение датчика перед измерением

Результаты измерения параметров шероховатости фрезерованной поверхности систематизированы в зависимости от режимов фрезерования для удобства установления влияния режимов (табл. 2...табл. 4). Каждая найденная экспериментально оценка параметра шероховатости является

средней величиной, заменяющей два результата экспериментального определения параметра. Для этого каждый опыт фрезерования поверхности дублировали, обрабатывая противоположные грани призматических образцов (рис. 3). Кроме того, каждый опыт измерения шероховатости на указанных противоположных гранях образцов также дублировали при измерении шероховатости (рис. 4).

Таблица 2 – Влияние подачи на зуб на шероховатость поверхности

Влияние режима / Вид профиля	Номер образца	Ra мкм	Rz мкм	R max мкм
1	2	3	4	5
S_Z $t_{\min} = 0,5 \text{ мм}$ $n_{\min} = 950 \text{ мин}^{-1}$ Апериодический	$S_{Z \min} = 0,15 \text{ мм/зуб}$			
	2	3,543	18,506	26,884
	$S_{Z \max} = 0,30 \text{ мм/зуб}$			
	8	3,827	20,789	26,043
S_Z $t_{\max} = 1,0 \text{ мм}$ $n_{\min} = 950 \text{ мин}^{-1}$ Апериодический	$S_{Z \min} = 0,15 \text{ мм/зуб}$			
	4	3,235	19,355	26,208
	$S_{Z \max} = 0,30 \text{ мм/зуб}$			
	6	4,712	24,688	30,136

Таблица 3 – Влияние глубины резания на шероховатость (продолжение табл.2)

1	2	3	4	5
t $S_{Z \min} = 0,15 \text{ мм/зуб}$ $n_{\min} = 950 \text{ мин}^{-1}$ Апериодический	$t_{\min} = 0,5 \text{ мм}$			
	2	3,543	18,506	26,884
	$t_{\max} = 1,0 \text{ мм}$			
	4	3,235	19,355	26,208
t $S_{Z \min} = 0,15 \text{ мм/зуб}$ $n_{\max} = 3800 \text{ мин}^{-1}$ Периодический	$t_{\min} = 0,5 \text{ мм}$			
	5	1,115	5,900	6,663
	$t_{\max} = 1,0 \text{ мм}$			
	7.1	0,945	5,309	6,314
t $S_{Z \max} = 0,30 \text{ мм/зуб}$ $n_{\min} = 950 \text{ мин}^{-1}$ Апериодический	$t_{\min} = 0,5 \text{ мм}$			
	8	3,827	20,789	26,043
	$t_{\max} = 1,0 \text{ мм}$			
	6	4,712	24,688	30,136

Таблица 4 – Влияние частоты вращения фрезы на шероховатость
(продолжение табл.2 и табл.3)

1	2	3	4	5
n $S_{Z\min} = 0,15$ мм/зуб $t_{\min} = 0,5$ мм	$n_{\min} = 950$ мин ⁻¹ <i>Аперiodический</i>			
	2	3,543	18,506	26,884
	$n_{\max} = 3800$ мин ⁻¹ <i>Периодический</i>			
	5	1,115	5,900	6,663
n $S_{Z\min} = 0,15$ мм/зуб $t_{\max} = 1,0$ мм	$n_{\min} = 950$ мин ⁻¹ <i>Аперiodический</i>			
	4	3,235	19,355	26,208
	$n_{\max} = 3800$ мин ⁻¹ <i>Периодический</i>			
	7.1	0,945	5,309	6,314

Установлено, что при фрезеровании возможно получение двух видов профилей: периодического и аперiodического (рис. 1). Периодическим профилем будем называть такой профиль, у которого неровности имеют приблизительно постоянный шаг и приблизительно одну и ту же высоту. Соответственно аперiodическим профилем называем сочетание неровностей, которое имеет разный шаг и разную высоту на интервале их оценки. Оба вида профилей – периодический и аперiodический – отражены в табл. 2...табл. 4.

В качестве примера можно привести профилограммы двух образцов, имеющих аперiodический и периодический профили, в том виде, как их подготавливает станция Т8000 (рис. 5). В обоих случаях длина пути трассирования контактного щупа составляет $lt = 15$ мм, длина оценки $ln = 12,5$ мм, базовая длина для оценки шероховатости $lr = \lambda c = 2,5$ мм, причём $ln = 5 \times lr$ и $lt = ln + 2lr$. Отличие длины измерения ($ln = 12,5$ мм) от пути трассирования ($lt = 15$ мм) вызвано тем, что начальный длиной $l_1 = 2,5$ мм и конечный длиной $l_2 = 2,5$ мм участки не используются для измерения, так как на этих участках измерительный щуп движется с переменной линейной скоростью (это отмечалось выше).

Для образцов № 2 и № 5 (рис. 5), имеющих аперiodический (№ 2) и периодический (№ 5) профиль, выбор базовой длины, длины измерения (оценки) и длины трассирования выполнен с учетом требований табл. 1. Первоначально, произвольно выбираем указанные выше параметры и выполняем измерение параметров шероховатости с помощью

станції Т8000. С учётом факта периодичности или аperiodичности профиля, корректируем выбранные базовую длину, длину оценки и длину трассировки в соответствии с табл. 1. Например, для образца № 5, имеющего периодический профиль в соответствии с профилограммой (рис. 5, б) шаг между выступами составляет $RSm = 0,6$ мм. Следовательно, $l_r = 2,5$ мм; $l_n = 12,5$ мм; $l_t = 15$ мм.

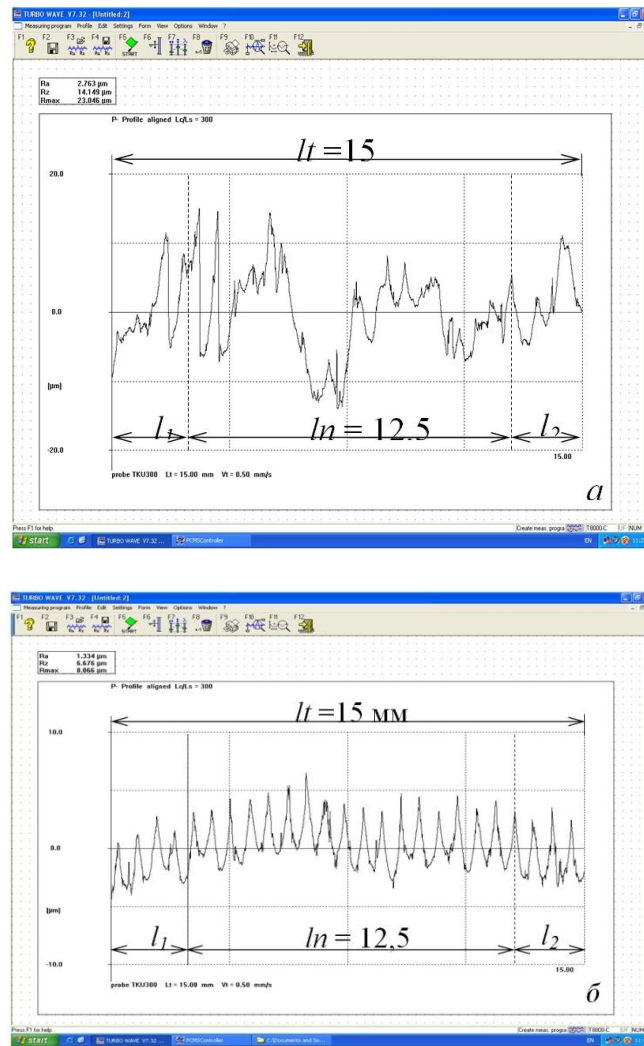


Рисунок 5 – Профилограммы поверхностей образцов № 2.1 и № 5.1, имеющих аperiodический (а) и периодический (б) профили микронеровностей

Из анализа табл. 2, 3 и 4 видно, что доминирующим элементом режима резания, влияющим на параметры шероховатости, является частота вращения шпинделя, в то время как подача на зуб фрезы и глубина

резания оказывают незначительное влияние на изменение шероховатости. Действительно, при увеличении подачи на зуб (табл. 2) шероховатость поверхности, увеличивается, или мало изменяется. Изменение глубины резания (табл.3) мало влияет на шероховатость поверхности. В то же время при увеличении скорости резания (табл. 4) шероховатость поверхности существенно уменьшается. Кроме того, изменение частоты вращения фрезы в диапазоне от 950 мин^{-1} до 3800 мин^{-1} (табл. 3 и табл. 4) является причиной появления на поверхности заготовки периодического профиля.

Выявленная периодичность микронеровностей на поверхности образца № 5.1 относится по принятой классификации геометрических характеристик качества поверхности [6] к волнистости. Действительно, отношение шага S элемента профиля к его высоте R изменяется в интервале от $620 \text{ мкм} / 6 \text{ мкм}$ до $600 \text{ мкм} / 5 \text{ мкм}$ (рис.5, б), т.е. величина отношения составляет 103...120.

Известно [2], что шаг S волнистости зависит от подачи на один оборот фрезы. Для образца № 5.1 подача на один зуб фрезы составляет $S_z = 0,15 \text{ мм/зуб}$. Следовательно, $S_{об} = 0,15 \cdot 4 = 0,6 \text{ мм/об}$, т.е. шаг неровностей равен оборотной подаче.

Время фрезерования в секундах, соответствующее пути $0,6 \text{ мм}$ (величина $S_{об}$), составляет $T = (60 \cdot 0,6) / (3800 \cdot 0,15 \cdot 4) = 0,015794 \text{ с}$. Время одного оборота фрезы составляет $T = 60 / 3800 = 0,015794 \text{ с}$. Таким образом, одна впадина периодического профиля образована фрезой за время одного её оборота.

5. Выводы и перспективы развития.

1. Представление формируемого при механической обработке размера в виде суммы постоянной и переменной составляющей этого размера соответствует частотному подходу в анализе профилограммы обработанной поверхности, позволяющему путём фильтрации сигнала, характеризующего выполняемый размер, выделять параметры точности (постоянная составляющая) и качества (переменная составляющая) обработанной поверхности.

2. Тот же самый частотный подход принято использовать при анализе вибраций в замкнутой упругой системе металлорежущего станка. Это позволяет с единых позиций рассматривать в одной и той же

частотной области разные по физической природе явления: формирование макро- и микрогеометрии обработанной поверхности, и динамический колебательный процесс (вибрации) в упругой системе металлорежущего станка, в котором выполняемый размер является замыкающим звеном замкнутой размерной цепи.

4. При увеличении подачи на зуб фрезы шероховатость поверхности, увеличивается, или мало изменяется. Изменение глубины резания мало влияет на шероховатость поверхности. При увеличении скорости резания шероховатость поверхности уменьшается и переходит в волнистость с периодическим профилем.

5. Применение частотного метода к анализу шероховатости и волнистости поверхности, с одной стороны, и к анализу вибраций в технологической системе с другой – позволит устанавливать детерминированные и корреляционные связи между вибрациями и параметрами качества обработанной поверхности.

Список использованных источников: 1. *Карташев А.И.* Шероховатость поверхности и методы её измерения. Под ред. канд. физ.-мат. наук Ю.В. Коломийцева. – М.: Изд-во гос. комитета стандартов, мер и измерит. приборов, 1964. – 163 с. 2. *Лоповок Т.С.* Волнистость поверхности и её измерение. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 184 с. 3. *Дунин-Барковский И.В.* Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / *И.В. Дунин-Барковский, А.Н. Карташова.* – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с. 4. *Табенкин А.Н.* Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / *А.Н. Табенкин, С.Б. Тарасов, С.Н. Степанов.* Под ред. канд. техн. наук *Н.А. Табачниковой.* – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 136 с. 5. Roughness measuring systems from Jenoptik – Surface texture parameters in practice [Electronic resource]. – Available on: <http://www.jenoptik.com/en-roughness-measurement-and-contour-measurement> Friday, 17 July 2015 12:09:07. 6. *Гжиров Р.И.* Краткий справочник конструктора: Справочник. – Л.: Машиностроение, 1983. – 464 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Kartashev A.I.* Sherokhovatost' poverkhnosti i metody ee izmereniya. Pod red. kand. fiz.-mat. nauk Yu.V. Kolomiytseva. – M.: Izd-vo gos. komiteta standartov, mer i izmerit. priborov, 1964. – 163 s. 2. *Lopovok T.S.* Volnistost' poverkhnosti i ee izmerenie. – M.: Izd-vo standartov, 1973. – 184 s. 3. *Dunin-Barkovskiy I.V.* Izmereniya i analiz sherokhovatosti, volnistosti i nekruglosti poverkhnosti / *I.V. Dunin-Barkovskiy, A.N. Kartashova.* – M.: Mashinostroenie, 1978. – 232 s. 4. *Tabenkin A.N.* Sherokhovatost', volnistost', profil'. Mezhdunarodnyy opyt / *A.N. Tabenkin, S.B. Tarasov, S.N. Stepanov.* Pod red. kand. tekhn. nauk N.A. Tabachnikovoy. – SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2007. – 136 s. 5. Roughness measuring systems from Jenoptik – Surface texture parameters in practice [Electronic resource]. – Available on: <http://www.jenoptik.com/en-roughness-measurement-and-contour-measurement> Friday, 17 July 2015 12:09:07. 6. *Gzhirrov R.I.* Kratkiy spravochnik konstruktora: Spravochnik. – L.: Mashinostroenie, 1983. – 464 s.

УДК 621.941

А.А. ОРГИЯН, д-р техн. наук, **А.В. БАЛАНЮК**,
АЛБАКУШ АИМЕН, Одесса, Украина

РАСЧЕТЫ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТОНКОГО РАСТАЧИВАНИЯ ГЛАДКИХ И СТУПЕНЧАТЫХ ОТВЕРСТИЙ.

В статті на основі розвитку теорії точності запропонований розрахунок статичних і динамічних похибок форми поперечного перерізу отвору при тонкому розточуванні. Значення цих похибок визначаються за номограмами, складеними для сталі, чавуну, алюмінію та бронзи. Запропоновано розрахункову модель для визначення динамічних похибок на основі технологічної динаміки.

В статье на основе развития теории точности предложен расчет статических и динамических погрешностей формы поперечного сечения отверстия при тонком растачивании. Значения этих погрешностей определяются по номограммам, составленным для стали, чугуна, алюминия и бронзы. Предложена расчетная модель для определения динамических погрешностей на основе технологической динамики.

In the article on the basis of the development of the theory of the accuracy of the proposed calculation of static and dynamic errors of the cross-sectional shape of the hole fine boring. The values of these errors are defined by nomograms compiled for steel, iron, aluminum and bronze. The proposed computational model for determining dynamic errors on the basis of technological dynamics.

Определение погрешностей при разных видах обработки, является актуальным направлением в изучении точности. Особенно актуальна задача повышения точности тонкого растачивания - финишной операции обработки прецизионных отверстий. Вероятно – статический метод исследования точности подробно изучен в работах [1, 2] и др. На основе методов теории вероятностей и математической статистики для отдельных видов обработки на металлорежущих станках были определены нормы "экономической точности".

Другим направлением исследований точности на основе изучения закономерностей явлений, в результате которых возникают погрешности обработки, явилось развитие расчетно-аналитического метода [3].

На практике часто используют сочетание расчетно-аналитического и вероятностно-статистического методов.

При тонком растачивании отверстий на отделочно – расточных станках возможны такие источники погрешностей [4]:

- 1) Отклонение от прямолинейности движения стола станка;
- 2) Деформации и упругие смещения элементов станка, шпинделя, борштанги, обрабатываемой заготовки с приспособлением от усилий закрепления, сил резания и трения в работающих подсистемах станка;
- 3) Размерный износ резцов;
- 4) Неравномерность жесткости системы УДИС;
- 5) Отклонения от соосности и параллельности осей шпинделей расточных головок, установленных на противоположных мостиках;
- 6) Биение шпинделя расточной головки;
- 7) Погрешность положения и формы отверстия в заготовке, а также погрешности установки заготовки;
- 8) Колебания в системе УДИС.

Оценивая влияние колебательных взаимодействий в замкнутой динамической системе станка на точность обработки, исследователи выделяют статическую и динамическую составляющие погрешностей обработки. Статические погрешности при тонком растачивании имеют частоту меньше низшей собственной частоты системы и, как правило кратную частоте вращения шпинделя. Наиболее часто статические погрешности формируют овальность отверстия. Изучая влияние вибраций на точность, следует отметить, что анализ круглограмм расточенных отверстий показывает, что колебания могут быть фактором,

преимущественно определяющим погрешности формы поперечного сечения.

В работе [5] разработана методика расчета следующих частных погрешностей:

Π_e – диаметральная погрешность формы обработанного отверстия, вызванная смещением оси отверстия в заготовке относительно оси шпинделя (рис. 1);

Π_o – диаметральная погрешность формы обработанного отверстия, вызванная овальностью отверстия в заготовке;

Π_k – диаметральная погрешность формы обработанного отверстия, вызванная неравномерностью радиальной податливости у резца по углу поворота шпинделя;

ΔR_D – отклонения от круглости поперечного сечения обработанного отверстия, вызванные колебаниями.

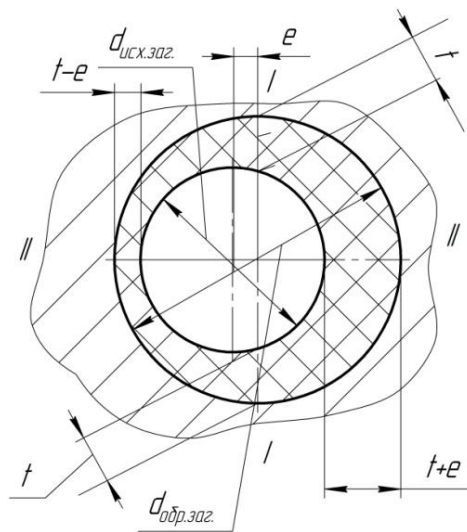


Рисунок 1 – Схема образования неравномерности припуска от смещения оси заготовки.

Первые три из названных погрешностей, возникающие под действием возмущений, имеющих периодичность вращения шпинделя, определяются статическим расчетом. Эти погрешности можно считать независимыми, а кривые их распределения – близкими к нормальным.

Поэтому суммарная статическая погрешность Π_c определяется выражением:

$$\Pi_c = t \sqrt{\frac{1}{9} \cdot \Pi_e^2 + \frac{1}{9} \cdot \Pi_o^2 + \frac{1}{9} \cdot \Pi_k^2}, \quad (1)$$

где t – коэффициент, определяющий процент получения брака при обработке. Для тонкого растачивания точных отверстий следует обеспечить достаточно низкий процент риска 0,27 %, а для этого следует выбрать $t = 3$.

Определение отклонений от круглости поперечного сечения, вызванных статическими возмущениями ΔR_c , сводится к переходу от диаметральной меры погрешности к радиальной:

$$\Delta R_c = 0,5 \Pi_c = 0,5 \sqrt{\Pi_e^2 + \Pi_o^2 + \Pi_k^2}. \quad (2)$$

Отклонения от круглости поперечного сечения, вызванные колебаниями, определяются амплитудой колебаний "А":

$$\Delta R_d = 2A, \quad (3)$$

так как при колебаниях радиус вписанной окружности уменьшается на А, а описанной – возрастает на "А": Сумма статических и динамических составляющих круглости определяет полное отклонение от круглости:

$$\Delta R = \Delta R_c + \Delta R_d. \quad (4)$$

Значения радиальной силы резания P_y , необходимые для расчета погрешностей, могут быть найдены по эмпирическим формулам, полученным для тонкого растачивания разных материалов. Сила P_y является степенной функцией глубины резания t и подачи s :

$$P_y = C_{py} \cdot t^{X_{py}} \cdot s^{Y_{py}}, \quad (5)$$

Значения величин, входящих в (1), приведены в таблице для разных обрабатываемых материалов.

Таблица

	Сталь	Чугун $H_B=170$	Бронза	Алюминиевый сплав
C_{py} (кг)	48	65	28	102
X_{py}	0,83	0,96	0,8	0,93
Y_{py}	0,44	0,77	0,53	0,8

Погрешность диаметрального размера обработанного отверстия, вызванную несовпадением осей отверстия в заготовке с осью шпинделя (неточностью установки заготовки в виде эксцентриситета) можно рассчитать по разности между отжимами борштанги в двух диаметральных плоскостях (рис. 1):

$$П_e = 2 \cdot K \cdot P_y(t) - K[P_y(t+e) + P_y(t-e)]. \quad (6)$$

Здесь K – радиальная податливость системы у резца;
 e – эксцентриситет.

Погрешность диаметра обработанного отверстия, вызванная отклонениями от круглости (например, в виде овальности) отверстия в заготовке, может быть рассчитана как удвоенная разность между соответствующими отжимами борштанги в направлениях осей овала (рис. 2):

$$П_o = 2 \cdot K[P_y(t) - P_y(t-H_o)], \quad (7)$$

где H_o – наибольшая разность радиусов отверстия в заготовке (овальность).

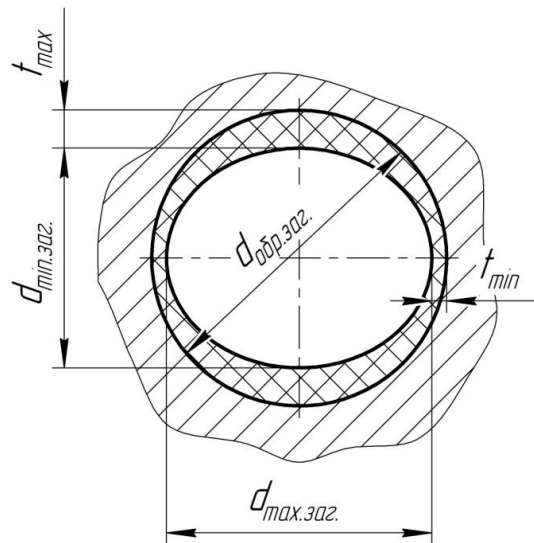


Рисунок 2 – Схема образования неравномерности припуска от предварительной овальности заготовки

Погрешность диаметра обработанного отверстия, вызванная неравномерностью радиальной податливости у резца по углу поворота шпинделя, может быть рассчитана как удвоенная разность между наибольшим и наименьшим отжимами борштанги в соответствующих диаметральных плоскостях:

$$\Pi_K = 2(K_{\max} P_y - K_{\min} P_y). \quad (8)$$

Сопоставление формул (6) – (8) после преобразований показывает, что они имеют однообразную структуру – произведение податливости, силы резания и некоторой функции f_i ($i = e, o, K$), вид которой определяется соответствующим источником статической погрешности

$$f_e\left(\frac{e}{t}\right) = 2 - \left(1 + \frac{e}{t}\right)^{X_{py}} - \left(1 - \frac{e}{t}\right)^{X_{py}},$$

$$f_o = 2 \left[1 - \left(1 - \frac{H_o}{t}\right) \right]^{X_{py}}, \quad (9)$$

$$f_K = \frac{2\Delta K}{K},$$

Следовательно соотношения 2, 3 и 4 могут быть представлены так:

$$P_i = K \cdot C_{py} \cdot t^{X_{py}} \cdot s^{Y_{py}} \cdot f_i. \quad (10)$$

Величины погрешностей, определяемых формулой (10), удобно определять по номограммам, составленными для стали, чугуна, алюминия. На рис. 3 приведена номограмма для чугуна. Для определения погрешностей следует во всех случаях назначить режимы резания (s, t) , определить податливость системы шпиндель - борштанга [7], а также значения e/t , $2\Delta K/K$ и H_0/t . Соединяя на номограмме отрезками прямых значения S и K , а также значения t с параметрами $2\Delta K/K$, или H_0/t получаем точки на промежуточных осях I и II. Соединяя соответствующие точки на осях I и II отрезками, находим точки пересечения последних с осью P_i , определяющей погрешность растачивания. Правила (ключи) пользования номограммой приведены на рис. 3.

Установлено, что 1/5 всех отверстий, обрабатываемых на ОРС ступенчатые. Для повышения производительности и точности в этих случаях применяют ступенчатые борштанги, оснащенные виброгасителями при больших вылетах. Для расчета погрешностей, возникающих в условиях тонкого растачивания многорезцовыми борштангами, сохраняется общий подход к определению частных погрешностей и методике их суммирования, приведенный ранее. Отличительной особенностью расчетов при многорезцовой обработке является учет взаимного влияния возмущений, возникающих на каждой из обрабатываемых ступеней отверстия.

Расчетная схема подсистемы шпиндель-борштанга приведена на рис. 4 [6].

Статические характеристики шпиндельного узла, оснащенного ступенчатой борштангой, следует принять такими же, как и в случае борштанги постоянного диаметра. Коэффициенты влияния δ_{iK} для ступенчатой борштанги рассчитаны для ступеней, в которых установлены резцы. Исходными данными для расчета являются параметры шпиндельного узла (C, EI_0, a_0, m_1) и параметры борштанги $(l_i, EI_i, \rho$ - плотность материала).

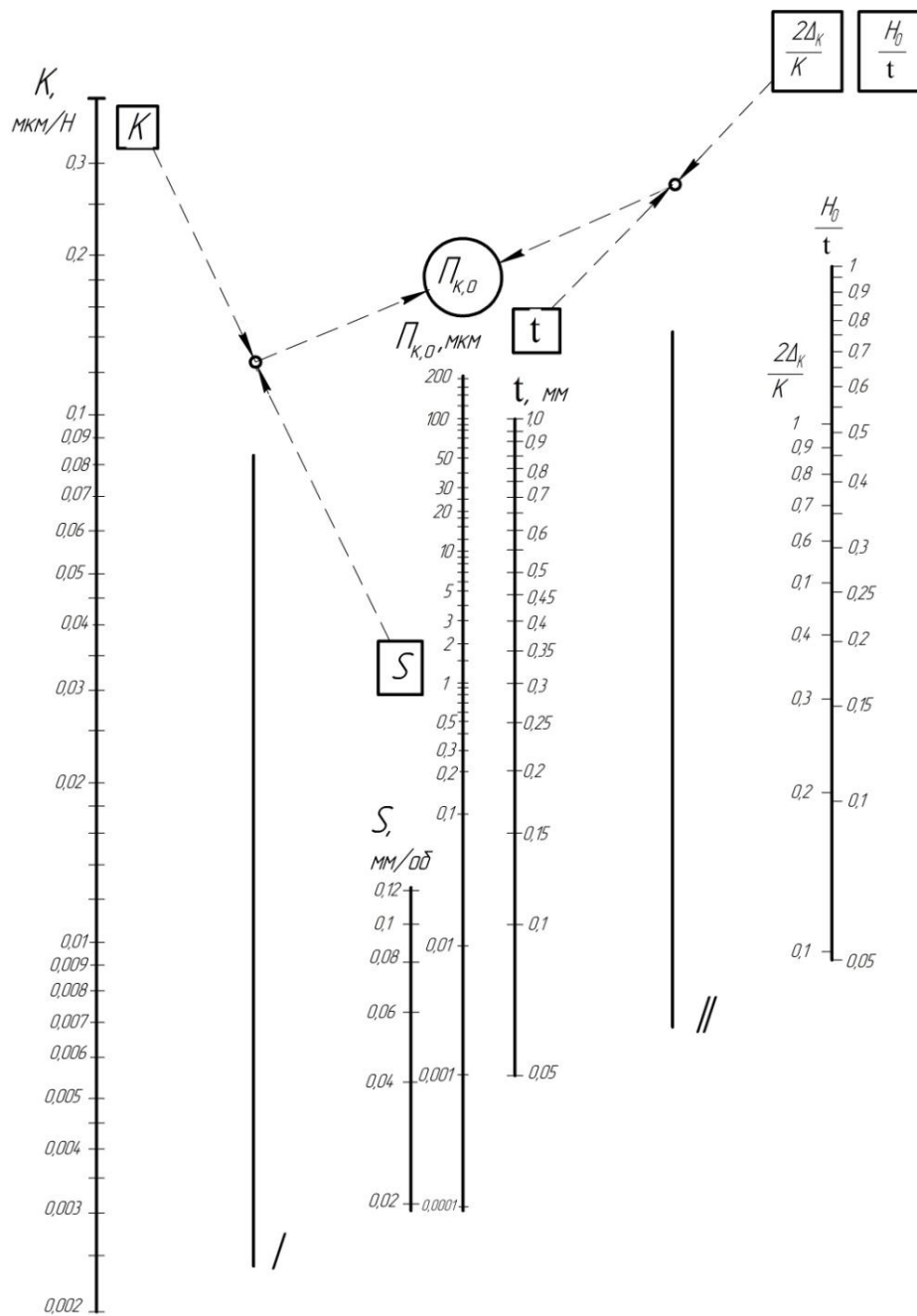


Рисунок 3 – Определение статических погрешностей при растачивании образцов (чугун) по номограмме

○ – значения частных погрешностей Π_i ;

K – податливость упругой системы;

S – подача на один оборот; t – глубина резания.

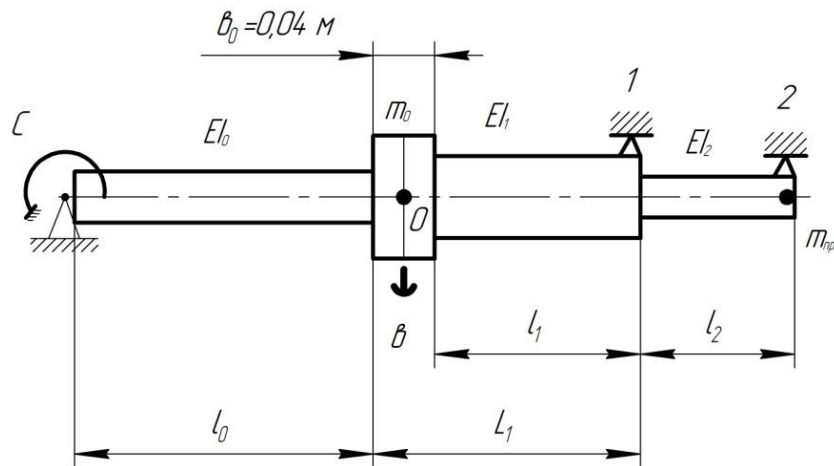


Рисунок 4 – Схема расчетной модели

Кроме того в расчет вводятся характеристики процесса резания и данные о возмущениях, действующих на замкнутую динамическую систему станка. Инерционная характеристика инструмента (m) во всех вариантах расчета определяется как масса борштанги, приведенная к сечению наиболее удаленного от фланца работающего резца. Вылеты ступеней борштанги и жесткости сечений обозначены соответственно l_1, l_2 и EI_1, EI_2 . Угловая жесткость опоры равна "С". Цифрами 0, 1 и 2 обозначены номера сечений у фланца и в местах расположения резцов. Фланец принят недеформируемым.

Коэффициенты влияния δ_{ik} (i – номер сечения, в котором определяется перемещение, k – номер сечения, в котором приложена единичная сила), определяем как сумму перемещений: $\delta_{ik \text{ угл.}}$ – вызванного углом поворота балки относительно опоры, и $\delta_{ik \text{ лин.}}$ – вызванного собственной деформацией балки. Перемещение $\delta_{ik \text{ угл.}}$ рассчитываем по формуле:

$$\delta_{ik \text{ угл.}} = \frac{l_i \cdot l_k}{C},$$

где l_i – расстояние от опоры С до i -того сечения;

l_k – расстояние от опоры С до k -того сечения.

Перемещение $\delta_{iK}^{лин}$ находим по формулам, составленным по способу Верещагина.

Приведенная выше методика расчета статических погрешностей при однорезцовой обработке основана на суммировании частных погрешностей, вызванных смещением осей заготовки и шпинделя (P_e), овальностью отверстия в заготовке (P_o) и неравномерностью податливости шпиндельного узла по углу поворота (P_K). Каждая из этих погрешностей, рассчитываемая как произведение податливости у резца (K) на известную функцию, представляет собой некоторое перемещение борштанги в сечении резца (9).

При многорезцовой обработке будем считать, что каждый j -тый из n работающих резцов вносит собственные погрешности P_{ej} , P_{oj} и P_{Kj} , величины которых находятся по номограммам (рис. 3) для однорезцовой обработки. Неравномерность податливости шпинделя по углу его поворота, характеризуемая, например, эллипсом, будет приводить к погрешностям на каждой из ступеней в виде эллипсов, оси которых будут лежать в одной плоскости. При этом полная погрешность обработки на каждой из ступеней (или иначе, для каждого номера резца), вызванная этим источником погрешности, найдется как сумма погрешностей: собственной и дополнительной от всех работающих резцов.

Дополнительные погрешности можно найти через коэффициенты влияния путем деления на собственную податливость у соответствующего резца ($K_j = \delta_{jj}$) и умножения на соответствующий коэффициент влияния. Например, при двухрезцовой обработке погрешность у второго резца равна:

$$P_{K1} \cdot \frac{\delta_{12}}{\delta_{11}} + P_{K2} \cdot \frac{\delta_{22}}{\delta_{22}}.$$

В обобщенном виде для i -того резца погрешность от неравномерной податливости равна:

$$\sum_{j=1}^n P_{Kj} \cdot \frac{\delta_{ji}}{\delta_{jj}}.$$

Можно допустить, что и остальные статические источники погрешностей вызывают искажения формы сечения отверстия, оси эллипсов которых имеют одинаковую ориентацию на всех ступенях. Тогда полная погрешность i -того резца от эксцентricности установки будет равна:

$$\sum_{j=1}^n P_{ej} \cdot \frac{\delta_{ji}}{\delta_{jj}}.$$

От предварительной овальности полная погрешность будет равна:

$$\sum_{j=1}^n P_{oj} \cdot \frac{\delta_{ji}}{\delta_{jj}}.$$

Полное отклонение от круглости формы поперечного сечения, определяемое для i -того резца влиянием статических погрешностей, может быть найдено по аналогии с (2) как:

$$\Delta R_{ci} = 0,5 \sqrt{\left[\sum_{j=1}^n P_{ej} \cdot \frac{\delta_{ji}}{\delta_{jj}} \right]^2 + \left[\sum_{j=1}^n P_{Kj} \cdot \frac{\delta_{ji}}{\delta_{jj}} \right]^2 + \left[\sum_{j=1}^n P_{oj} \cdot \frac{\delta_{ji}}{\delta_{jj}} \right]^2}. \quad (11)$$

Динамические погрешности при тонком растачивании определяются расчетом вынужденных колебаний [6].

На рис. 5 приведены результаты расчетов и экспериментов, характеризующие зависимость P_o от соотношения длин ступеней борштанги.

Разработанная расчетная методика представляет собой развитие общей теории точности обработки, созданной работами ученых - технологов и вошедшей в монографии и современные справочные издания Маталина А.А., Косиловой А.Г., и др.. Предложенная методика уточняет и развивает общие представления и способы для определения точности формы поперечного сечения отверстия, обработанного на отделочно-расточном станке. Полученные результаты относятся к определению погрешностей обработки, порождаемых статическими и динамическими деформациями шпиндельного узла с борштангой в условиях высокой жесткости обрабатываемой заготовки и приспособления, в котором она установлена.

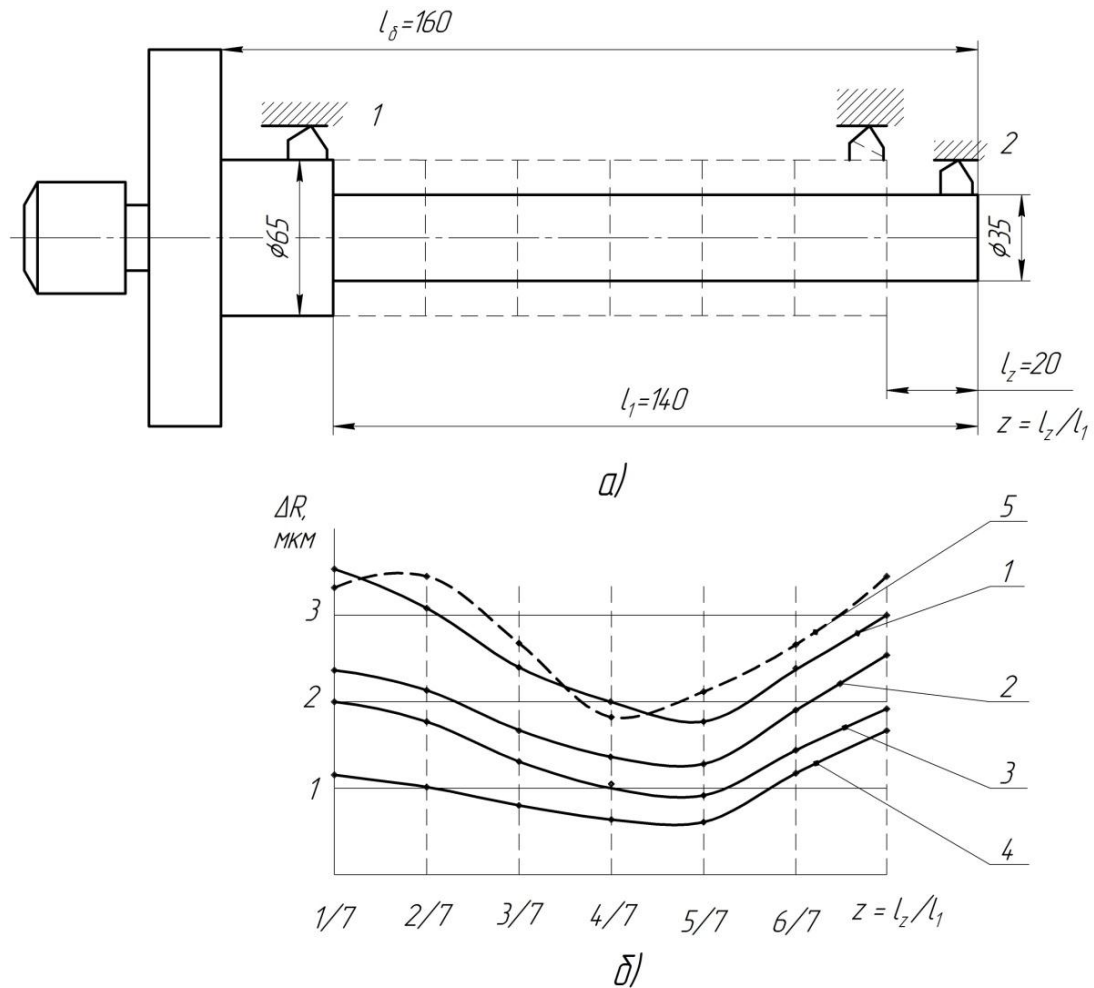


Рисунок 5 – Зависимость отклонения от круглости отверстий от соотношения длин ступеней борштанги:

а) эскиз борштанги;

б) измерения на $d_0 = 35$:

сталь 45, $v = 180 \text{ м/мин}$; $s = 0,05 \text{ мм/об}$;

$t = 0,3 \text{ мм}$: 1 – работают резцы 1 и 2;

2 – работает резец 2; 5 – эксперимент

$t = 0,1 \text{ мм}$: 3 – работают резцы 1 и 2; 4 – работает резец 2

Выводы:

1. Предложена расчетная методика определения статических и динамических погрешностей формы поперечного сечения отверстия при тонком растачивании.
2. Определение величины погрешностей ведется по номограммам, составленным для стали, чугуна, бронзы и алюминия.
3. Приведены соотношения для определения частных погрешностей при растачивании гладких и ступенчатых отверстий.
4. Установлено, что при обработке отверстий за один проход на точность сильно влияет овальность отверстия в заготовке. Для борштанг диаметром d_1 от 40 до 80 мм при относительной длине инструмента (l_B / d_B) от 1 до 4 и глубине резания от 0,05 до 0,4 мм можно принять усредненное соотношение между частными погрешностями $П_K : П_O : П_e = 10 : 100 : 5$. Однако, после второго прохода это соотношение изменяется из — за значительного уменьшения $П_O$, и для средних значений выполняется соотношение $П_K : П_O : П_e = 100 : 20 : 1$, то есть определяющим точность фактором становится переменность податливости.

Список использованных источников: 1. Маталин А. А. Технология машиностроения: Учебник. 2-е изд., испр. СПб.: Издательство «Лань», 2008.— 512 с: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература). ISBN 978-5-8114-0771-2. 4. 2. Корсаков В.С. (ред.) Основы технологии машиностроения. Учебник для вузов. - Кован В. М., Корсаков В. С., Косилова А. Г. под ред. Корсакова В. С. - изд. 3-е, доп. и перераб. М.: Машиностроение, 1977. - 416 с. 4. 3. Обработка металлов резанием: Справочник технолога [Текст] А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойм и др.; Под общ. ред. А.А. Панова. 2-е изд., перераб. И доп. — М.: Машиностроение, 2004. — 784 с.: ил. — ISBN 5-94275-049-1. 4. П.А. Лінчевський та ін.. Обробка деталей на обробно-розточувальних верстатах / П.А. Лінчевський, Т.Г. Джугурян, О.А. Оргіян, за заг. ред.. П.А. Лінчевського. — К.: Техніка, 2000. — 300с. ISBN 966-575-048-8. 5. А.А. Оргіян, А.В. Баланюк "Технологическая динамика тонкого растачивания двухступенчатых отверстий". Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві: збірник наукових праць. —

Вип. 3(8). – О.: Наука і техніка, 2015. с. 213 – 223. 6. А.В. Баланюк "Колебания двухступенчатых консольных борштанг при тонком растачивании". Збірник наукових праць (галузеve машинобудування, будівництво) / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. 2014р. Стр. 131 – 139. 7. Нормативы режимов резания и геометрия резцов для тонкого растачивания. Обработка на отделочно-расточных станках. Крупносерийное и массовое производство. НИИмаш., Москва 1979. – 93с.

Bibliography (transliterated): 1. Matalin A. A. Tehnologija mashinostroenija: Uchebnik. 2-e izd., ispr. SPb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2008.— 512 s: il.— (Uchebniki dlja vuzov. Special'naja literatura). ISBN 978-5-8114-0771-2. 4. 2. Korsakov V.S. (red.) Osnovy tehnologii mashinostroenija. Uchebnik dlja vuzov. - Kovan V. M., Korsakov V. S., Kosilova A. G. pod red. Korsakova V. S. - izd. 3-e, dop. i pererab. M.: Mashinostroenie, 1977. - 416 s. 4. 3. Obrabotka metallov rezaniem: Spravochnik tehnologa [Tekst] A.A. Panov, V.V. Anikin, N.G. Bojm i dr.; Pod obshh. red. A.A. Panova. 2-e izd., pererab. I dop. – M.: Mashinostroenie, 2004. – 784 s.: il. – ISBN 5-94275-049-1. 4. P.A. Linchevs'kij ta in.. Obrobka detalej na obrobno-roztochuval'nih verstatah / P.A. Linchevs'kij, T.G. Dzhugurjan, O.A. Orgijan, za zag. red.. P.A. Linchevs'kogo. – K.: Tehnika, 2000. – 300s. ISBN 966-575-048-8. 5. A.A. Orgijan, A.V. Balanjuk "Tehnologicheskaja dinamika tonkogo rastachivaniya dvuhstupenchatyh otverstij". Informacijni tehnologії v osviti, nauci ta virobnictvi: zbirnik naukovih prac'. – Vip. 3(8). – О.: Nauka i tehnika, 2015. s. 213 – 223. 6. A.V. Balanjuk "Kolebanija druhstupenchatyh konsol'nyh borshtang pri tonkom rastachivanii". Zbirnik naukovih prac' (galuzeve mashinobuduvannja, budivnictvo) / Poltavs'kij nacional'nij tehničnij universitet imeni Jurija Kondratjuka. 2014r. Str. 131 – 139. 7. Normativy rezhimov rezanija i geometrija rezcov dlja tonkogo rastachivaniya. Obrabotka na otdelochno-rastochnyh stankah. Krupnoseriynoe i massovoe proizvodstvo. NIImash., Moskva 1979. – 93s.

УДК 621.922.04

Н.С. РАВСЬКА, д-р техн. наук,
О.А. ОХРИМЕНКО, канд. техн. наук, Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ВІДХИЛЕННЯ ПРОФІЛЮ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ВІД ЕВОЛЬВЕНТНОГО ПРИ ЇХ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННІ ЧЕРВ'ЯЧНИМИ ФРЕЗАМИ

В роботі досліджено вплив конструктивних параметрів черв'ячних фрез і зубчастих коліс на точність профілю зубчастого колеса. З врахуванням кінематики процесу зубофрезерування на прикладі вихідних інструментальних поверхонь архімедових і конволютних черв'ячних фрез визначені похибки профілю прямозубих зубчастих коліс, які виникають при заміні теоретично точного евольвентного черв'яка. Встановлено, що корекцією профільного кута вихідної інструментальної поверхні можна зменшити похибки профілю зубчастого колеса. За результатами досліджень запропоновано раціональні параметри кутової корекції профілю вихідної інструментальної поверхні черв'ячних фрез, що забезпечують мінімальні відхилення профілю колеса від евольвенти.

В работе исследовано влияние конструктивных параметров червячных фрез и зубчатых колес на точность профиля зубчатого колеса. С учетом кинематики процесса зубофрезерования на примере выходных инструментальных поверхностей архимедовых и конволютных червячных фрез определены погрешности профиля прямозубых зубчатых колес, которые возникают при замене теоретически точного эвольвентного червяка. Установлено, что коррекцией профильного угла исходной инструментальной поверхности можно уменьшить погрешности профиля зубчатого колеса. По результатам исследований предложены рациональные параметры угловой коррекции профиля исходной инструментальной поверхности червячных фрез, которые обеспечивают минимальные отклонения профиля колеса от эвольвенты.

The article of the design parameters of hobs and gear profile accuracy gear. In view of the kinematics of hobbing an example output of tool surfaces and buoyancy ZA, ZN worm defined error profile spur gears, which arise when replacing the theoretically precise involute(ZI) worm. It is found that the correction angle of the profile of the original surface of the tool can reduce the error profile of a gear wheel. According to the research proposed rational parameters of the profile of the original angular correction tool surfaces of hobs, which ensure minimal deviation from the involute profile of the wheel.

© Н.С. Равська, О.А. Охріменко, 2015

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Основою проектування черв'ячних фрез є теорія формоутворення зубчастих коліс черв'ячними фрезами [1,2]. Теорія формоутворення зубчастих коліс черв'ячними фрезами ґрунтується на багатьох припущеннях [3, 4]. Одне з них є те, що процес зубофрезерування черв'ячними фрезами розглядається як процес формоутворення плоскою рейкою на площині. Таке уявлення процесу утворення зубчастих коліс не відтворює в повній мірі процес їх зубонарізання, що і є одною з причин відхилення профілю зубчастих коліс від евольвентного. Проте кількісна оцінка цього відхилення не досліджена.

Визначення та дослідження впливу на її значення конструктивних параметрів коліс та черв'ячних фрез при розгляді ідеального процесу зубофрезерування з врахуванням кінематики цього процесу черв'ячними фрезами з архімедовим чи конвалютним черв'яком дозволить на стадії проектування встановлювати можливу точність зубчастих коліс в залежності від параметрів коліс та черв'ячних фрез і розробляти шляхи підвищення їх точності.

Ця задача для циліндричних прямозубих коліс вирішується в цій роботі.

МЕТА ДОСЛІДЖЕНЬ полягає в визначенні впливу параметрів зубчастих коліс та черв'ячних фрез на точність циліндричних прямозубих коліс для подальшої розробки методів і способів підвищення їх точності.

ПОПЕРЕДНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Серед існуючих методів аналізу формоутворення зубчастих коліс найбільш поширеним є метод порівняння перерізу теоретично точного з існуючим [5]. У цьому випадку переріз вибирається в площині дотичній до основного циліндра евольвентного черв'яка, для якого переріз такого черв'яка буде прямолінійним. При цьому вважається, що похибки по нормалі переносяться на профіль зуба колеса. Недоліком такого методу є

те, що він не враховує обертання фрези та колеса навколо своїх осей та рух фрези вздовж колеса.

В роботі [6] при порівнянні черв'яків у нормальному перерізі за сталу береться прямобічна рейка, в той час як для евольвентного черв'яка прямолінійний профіль буде в перерізі дотичному до основного циліндра, що безумовно це припущення впливає на похибки профілю колеса.

Відомі також методи визначення відхилень, в основу яких покладено метод Олів'є, згідно якого спочатку визначається рейка, спряжена із черв'яком, а потім колесо спряжене з рейкою.

У даному випадку рейка розглядається плоскою, хоча процес зубофрезерування здійснюється в просторі. Разом з тим при визначенні відхилень профілю необхідно враховувати всі рухи, які в просторі здійснюють фреза та нарізуване колесо.

В роботах [2, 6, 7] для вирішення задачі відхилень профілю колеса від евольвентного з врахуванням всіх рухів, що здійснюються в процесі зубонарізання виведені рівняння контакту для архімедового та конволютного черв'яків:

$$R_2 = m_{20s} \cdot m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_1(t, u); b_u = b_f; i_{12} = \frac{f_{01}}{f_{02}} = \frac{k_f}{Z_k};$$

$$m_{01} = \begin{pmatrix} \cos f_{01} & -\sin f_{01} & 0 & 0 \\ \sin f_{01} & \cos f_{01} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; m_{20} = \begin{pmatrix} \cos b_u & 0 & \sin b_u & 0 \\ 0 & 1 & 0 & A_0 \\ -\sin b_u & 0 & \cos b_u & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$m_{20f} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(i_{12} f_{01}) & -\sin(i_{12} f_{01}) & 0 \\ 0 & \sin(i_{12} f_{01}) & \cos(i_{12} f_{01}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; m_{20s} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & s_{02} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 NV_{fi} = & \left| \begin{array}{ccc} \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Xi}(t, u))}{\partial t} & \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Yi}(t, u))}{\partial t} & \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Zi}(t, u))}{\partial t} \\ \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Xi}(t, u))}{\partial u} & \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Yi}(t, u))}{\partial u} & \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Zi}(t, u))}{\partial u} \\ \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Xi}(t, u))}{\partial f_{01}} & \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Yi}(t, u))}{\partial f_{01}} & \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Zi}(t, u))}{\partial f_{01}} \end{array} \right| = 0 \\
 NV_{si} = & \left| \begin{array}{ccc} \frac{\partial(m_{20l} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Xi}(t, u))}{\partial t} & \frac{\partial(m_{20l} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Yi}(t, u))}{\partial t} & \frac{\partial(m_{20l} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Zi}(t, u))}{\partial t} \\ \frac{\partial(m_{20l} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Xi}(t, u))}{\partial u} & \frac{\partial(m_{20l} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Yi}(t, u))}{\partial u} & \frac{\partial(m_{20l} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Zi}(t, u))}{\partial u} \\ \frac{\partial(m_{20l} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Xi}(t, u))}{\partial s_{02}} & \frac{\partial(m_{20l} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Yi}(t, u))}{\partial s_{02}} & \frac{\partial(m_{20l} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Zi}(t, u))}{\partial s_{02}} \end{array} \right| = 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

де f_{01} – кут повороту фрези, f_{02} – кут повороту колеса, s_{02} -переміщення фрези вздовж осі колеса, Z_k – кількість зубів нарізає мого колеса, b_u – кут установки фрези, b_f – кут нахилу гвинтової лінії витків фрези, i_{12} – передаточне відношення фреза-колесо, k_f – кількість заходів фрези, A_0 – міжосьова відстань, R_2 - радіус вектор пов'язаний з зубчастим колесом, $R_1(u, t)$ - радіус вектор пов'язаний з вихідною інструментальною поверхнею (ВІП) фрези, u, t – незалежні параметри, що описують ВІП фрези, m_{01} – матриця повороту фрези, m_{20} – матриця розвороту фрези і встановлення міжосьової відстані, m_{20f} – матриця повороту колеса, m_{20s} – матриця руху фрези вздовж осі колеса.

$$R_1(u, t) = \begin{pmatrix} u \cos a_{01} \cos t - \sin b_{f1} \sin t \cdot (A_1 - u \cdot \sin a_{01}) \\ u \cos a_{01} \sin t + \sin b_{f1} \cos t \cdot (A_1 - u \cdot \sin a_{01}) \\ p_f \cdot t - \cos b_{f1} \cdot (A_1 - u \cdot \sin a_{01}) \\ 1 \end{pmatrix}, \tag{2}$$

де a_{01} – кут нахилу твірної профілю ВІП фрези, b_{f1} – кут розташування площини в якій розташовано твірну профілю ВІП фрези, p_f – гвинтовий параметр ВІП фрези, A_1 – постійний параметр, що відповідає за

симетричне розташування витка ВІП фрези відносно міжосьового перпендикуляра (рис. 1).

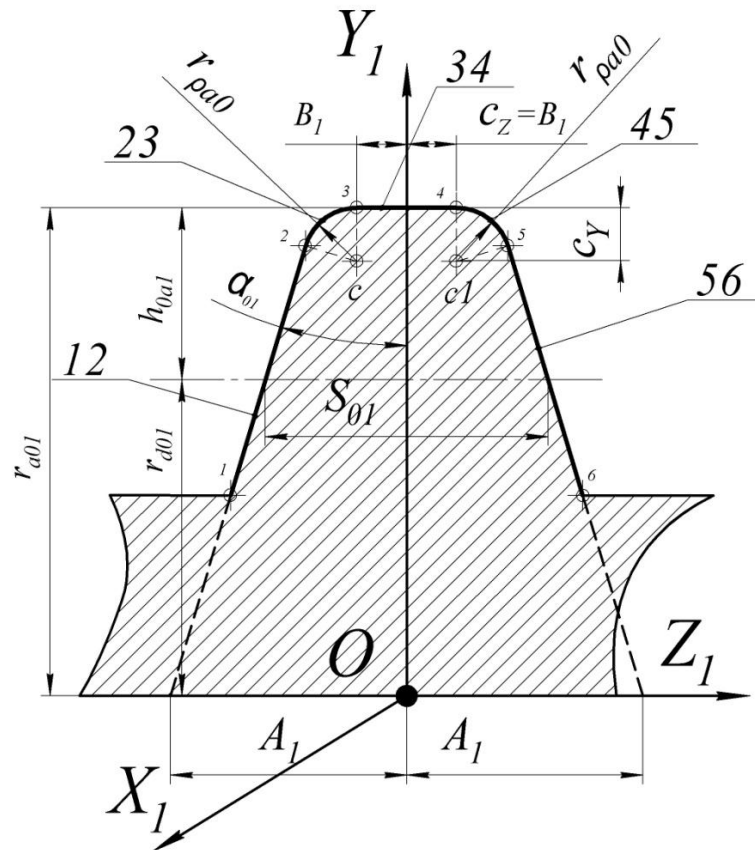


Рисунок 1 – Твірний профіль вихідної інструментальної поверхні стандартної черв'ячної фрези

На основі цих рівнянь можна визначити відхилення профілю зуба колеса від евольвенти в залежності від параметрів колеса і черв'ячної фрези.

В роботі [2] показано, що за рахунок раціонального вибору кута профілю вихідного утворюючого контуру можна підвищити точність виготовлення зубчастих коліс.

Тому в даній статті приведені дослідження відхилення профілю зубів коліс в теоретично точною для стандартних черв'ячних фрез і фрез з коректованим профілем вихідної інструментальної поверхні для архімедовим і конволютних черв'яків.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДХИЛЕННЯ ПРОФІЛЮ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ВІД ЕВОЛЬВЕНТИ

В основу розрахунків відхилення профілю зубчастих коліс покладені рівняння (1 та 2).

Аналіз цих рівнянь показує, що профіль зубчастих коліс при зубофрезеруванні черв'ячними фрезами з врахуванням кінематики цього процесу перш за все залежить від кута профілю вихідного утворюючого контуру.

На рис. 2 наведена залежність зміни оптимальних кутів утворюючого контуру фрез модулем $m=5\text{мм}$ та $m=10\text{мм}$. З конволютних та архімедовим черв'яком при формоутворенні прямозубих зубчастих коліс.

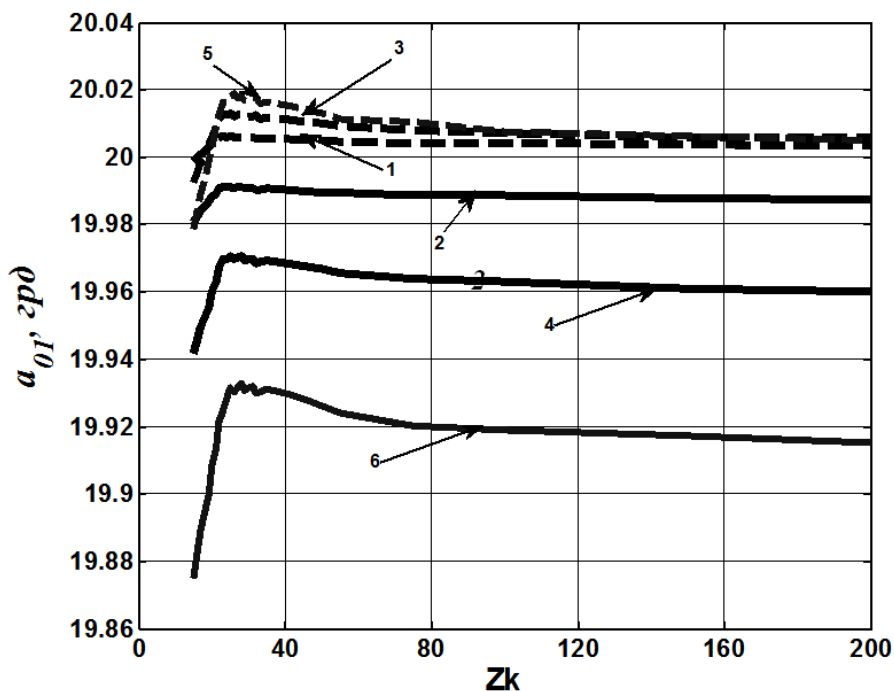


Рисунок 2 - Кути вихідного інструментального контуру a_{01} ВІП фрези, що забезпечують мінімальні відхилення профілю прямозубого зубчатого колеса від евольвенти f_f в залежності від кількості зубів нарізаємого колеса Z_k :

- 1 – $m=5$, діаметр $d_a=100$, архімедова, 2 – $m=5$, $d_a=100$, конволютна,
 3 – $m=10$, $d_a=150$, архімедова, 4 – $m=10$, $d_a=150$, конволютна,
 5 – $m=20$, $d_a=250$, архімедова, 6 – $m=20$, $d_a=250$, конволютна

Як показують наведені залежності оптимальні кути утворюючого контуру в порівнянні із стандартним номінальним контуром для коліс з конволютним черв'яком зменшуються, для фрез з архімедовим – збільшується, при чому зі збільшенням модуля відхилення від номінального профілю збільшується.

Розглянемо відхилення профілю зубчастих коліс від евольвентного при їх зубофрезеруванні стандартними черв'ячними фрезами та фрезами зі спроектованим профілем (рис. 3).

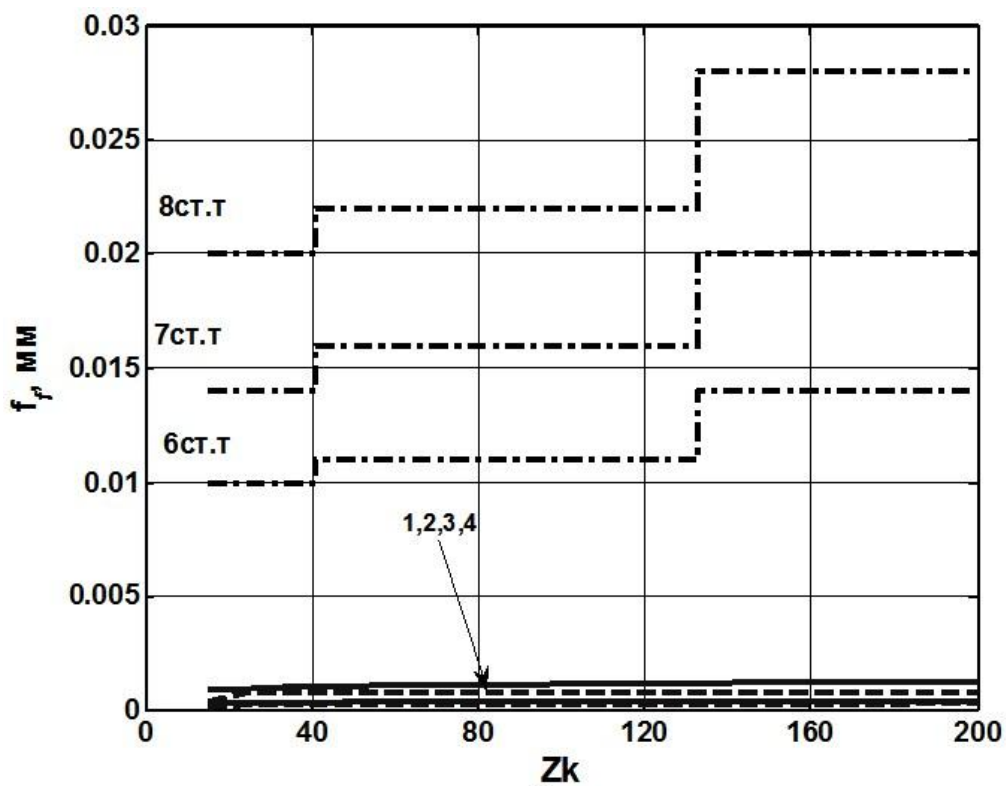


Рисунок 3 – Розрахункові відхилення профілю зубчастих коліс f_f від евольвентного при їх зубофрезеруванні стандартними черв'ячними фрезами від кількості зубів нарізаємого колеса Z_k :

- 1 – $m=3$, діаметр $d_a=80$, архімедова, 2 – $m=3$, $d_a=80$, конволютна,
3 – $m=3$, $d_a=112$, архімедова, 4 – $m=3$, $d_a=112$, конволютна

З рис. 3 видно, що при зубофрезеруванні зубчастих коліс модулем $m=3\text{мм}$, з врахуванням кінематики процесу не залежить від кількості зубів, відхилення, від профілю відповідають 6-й системі точності. В зв'язку з цим кут вихідного контуру коректувати не потрібно.

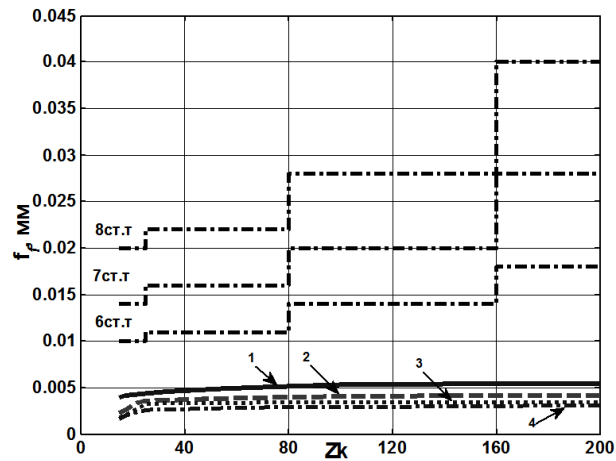
На рис. 4 наведені результати відхилення профілю зубчастих коліс від евольвентного при їх зубофрезеруванні черв'ячними фрезами зі стандартними скоректованим кутом профілю вихідного контуру для модулів 5, 10, 20 мм.

За розрахунками отримуємо, що при корекції кута профілю ВІП фрези до 30% можна зменшити відхилення профілю колеса від теоретично точного для модулів 5-20мм. при використанні ВІП фрези на базі конволютних черв'яків, для ВІП на базі архімедових черв'яків підвищення точності менше приблизно 15%. Для фрез модулем 5мм розрахункове підвищення точності дозволяє отримати похибку профілю колеса на $1/3$ від допуску на 6 ступінь точності профілю зубчастого колеса, яку за рекомендаціями відносять до похибок інструменту, а все інше до похибок технологічної системи (рис. 4 а).

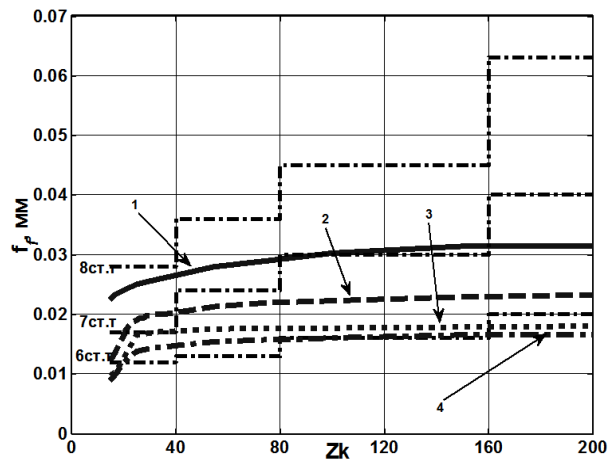
Для модуля 10мм тільки архімедовий черв'як з коректованим кутом профілю для 8 ступені точності профілю дозволяє отримати похибку профілю колеса на $1/3$ від допуску на точність колеса. Конволютний черв'як з коректованим кутом профілю за розрахунками дає можливість отримати похибку тільки на $2/3$ від допуску на 8 ступінь точності колеса по профілю для чисел зубів коліс до 160. Гарантовано розрахункова похибка профілю колеса від $1/3$ допуску на точність буде при формоутворення зубчастих коліс с числом зубів 160 і більше(рис. 4 б).

Для 20 мм використовуючи тільки корекцію профілю не можливо забезпечити розрахункову точність відповідно до допуску на точність профілю зубчастого колеса, для такого випадку необхідно рекомендувати профілювати такі фрези на більшому діаметрі, однак діаметр 250 мм, який використовувався в розрахунках згідно стандарту на суцільні фрези є граничним. Для підвищення точності профілю зубчастих коліс модулем 20 мм можна рекомендувати використовувати ламаний профіль черв'яка [2].

4.а)



4.б)



4.в)

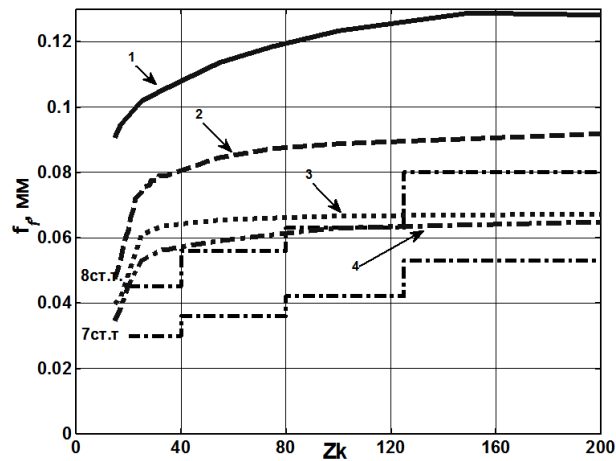


Рисунок 4 – Розрахункові відхилення профілю зубчастих коліс f_f від евольвентного при їх зубофрезеруванні ВІП стандартних черв'ячних фрез та з скоректованим кутом профілю в залежності від кількості зубів нарізаємого колеса Z_k , 1 – стандартний кут профілю конволютний черв'як, 2 – з коректований кут профілю конволютний черв'як, 3- стандартний кут профілю архімедовий черв'як, 4- з коректований кут профілю архімедовий черв'як: 4а) – $m=5$, діаметр $d_a=100$, 4б) – $m=10$, $d_a=150$, 4в) – $m=20$, $d_a=250$

ВИСНОВОК

В роботі розглянуто вплив параметрів зубчастих коліс та черв'ячних фрез на точність циліндричних прямозубих коліс при їх формоутворенні.

Встановлено, що при стандартних кутах профілю ВІП фрези похибка профілю зубчастого колеса зростає зі збільшенням числа зубів колеса. На прикладі формоутворення прямозубих зубчастих коліс отримано, що корекція кута профілю ВІП фрези є найбільш ефективна в діапазоні модулів більше 5-10 мм для конволютних черв'ячних фрез.

Список використаних джерел: 1. Родин П.Р. Основы проектирования режущих инструментов/ П.Р. Родин – К: Вища школа, 1990-424с. 2. Богуслаев В.О. Формоутворення черв'ячних фрез / В.О. Богуслаев, Н.С. Равська Н.С., О.Я. Качан, К.Б. Балушок, В.Ф. Мозговой, О.А. Охріменко – Запоріжжя вид. ВАТ "Мотор Січ", 2007 – 179с. 3. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений / Ф.Л. Литвин – М: Наука, 1968 – 586с. 4. Люкишин В.С. Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов – М: Машиностроение, 1967 – 372 с. 5. Сахаров Г.Н. Металлорежущие инструменты / Сахаров Г.Н., Арбузов О.Б., Боровой Ю.Л., Гречишников В.А., Киселев А.С. – М: Машиностроение, 1989 – 328с. 6. Охріменко О.А. Формоутворення поверхні зубчастих косозубих зубчастих коліс при зубофрезеруванні.//Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. №31, 2013 С.38-46. 7. Охріменко О.А. Формоутворення прямозубих зубчастих коліс конічними черв'ячними фрезами.// Процеси технології обробки в машинобудуванні. Збірник наукових праць. ЖДТУ №12. – Житомир 2012 – С. 98-107.

Bibliography (transliterated): 1.Rodin P.R. Osnovy proektirovaniya rezhushhih instrumentov/ P.R. Rodin – K: Vishha shkola, 1990-424s. 2.Boguslaev V.O. Formoutvorennja cherv'jachnih frez / V.O. Boguslaev, N.S. Rav'ska N.S., O.Ja. Kachan, K.B. Balushok, V.F. Mozgovoj, O.A. Ohrimenko – Zaporizhzhja vid. VAT "Motor Sich", 2007-179s. 3.Litvin F.L. Teorija zubchastyh zaceplenij / F.L. Litvin – M: Nauka, 1968-586s. 4.Ljukishin V.S. Teorija vintovyh poverhnostej v proektirovanii rezhushhih instrumentov – M: Mashinostroenie, 1967-372s. 5. Saharov G.N. Metallorezhushhie instrumenty / Saharov G.N., Arbuzov O.B., Borovoj Ju.L., Grechishnikov V.A., Kiselev A.S. – M: Mashinostroenie, 1989-328s. 6.Ohrimenko O.A. Formoutvorennja poverhni zubchastih kosozubih zubchastih kolis pri zubofrezeruvanni.//Nadijnist' instrumentu ta optimizacija tehnologichnih sistem. Zbirnik naukovih prac'. – Kramators'k, vip. №31, 2013 С.38-46. 7. Ohrimenko O.A. Formoutvorennja prjamozubih zubchastih kolis konichnimi cherv'jachnimi frezami.// Procesi tehnologij obrobki v mashinobuduvanni. Zbirnik naukovih prac'. ZhDTU №12 Zhitomir 2012 S98-107.

УДК 621.74:004.942

В.М. ТОНКОНОГИЙ, д-р. техн. наук,
И.В. ПРОКОПОВИЧ, канд. техн. наук,
М.А. ДУХАНИНА, А.В. ШМАРАЕВ, Одесса, Украина

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ

Показано, що більшість об'єктів ливарного виробництва має структурну чутливість: залежність якості кінцевого продукту – виливки від структури цих об'єктів. Запропоновані методи кількісної оцінки взаємозв'язків «технологія – структура – властивості» і параметрів, за якими ця оцінка проводиться.

Показано, что большинство объектов литейного производства обладает структурной чувствительностью: зависимостью качества конечного продукта –отливки от структуры этих объектов. Предложены методы количественной оценки взаимосвязей «технология – структура – свойства» и параметров, по которым эта оценка производится.

It is shown that most of the objects foundry has a structural sensitivity: dependence on the quality of the final product –the casting of the structure of these objects. The methods for quantifying relationships "technology –structure –property" and the parameters on which this assessment is made.

Введение. Количество материалов, единиц оборудования и технологий литейного производства превышает десятки тысяч. Как и всякая сложная система, каждая из них может быть представлена в виде отдельных подсистем, а значит, обладает структурой: набором элементов и связей между ними. Поэтому свойства каждого объекта в значительной степени зависят от этой структуры и, следовательно, качество результата литейного производства –отливки также зависит от этой структуры. Более того, сама отливка также обладает структурой, и, следовательно, проблема структурочувствительности сопровождает жизненный цикл литейного производства, начиная от исходных материалов и кончая готовыми изделиями.

Постановка проблемы. Структурочувствительность объектов литейного производства – понятие качественное. Поэтому, для того чтобы иметь возможность оценивать эту чувствительность или сравнивать два однородных объекта по ее величине необходимо решить задачу выбора параметров структурной чувствительности, а также единиц и методов их измерения. Большое значение при решении этой задачи имеет

© *В.М. Тонконогий, И.В. Прокопович, М.А. Духанина, А.В. Шмараев, 2015*

стохастичность многих характеристик литейного производства. Разрабатываемые параметры должны учитывать эту стохастичность. Важнейшим аспектом проблемы, без которого решение задачи оценивания структурной чувствительности объектов литейного производства не имеет смысла, является связь между технологией литейного производства на этапах ее проектирования и управления, с этой структурой. Ведь, в конечном итоге, только по цепочке «технология → структура → качество» можно эффективно управлять последним.

Обзор существующих достижений. Поскольку объекты литейного производства (ОЛП) крайне разнородны, параметры их структурной чувствительности существуют разные. Попытку связать технологические характеристики со свойствами литейных форм и отливок осуществляли многие исследователи. В частности, предпринимались попытки связать технологию чугунного литья с герметичностью отливки [1, 2], технологию изготовления песчаной литейной формы с условиями протекания в ней [3 – 5], технологическую структурную чувствительность вспомогательных материалов с их свойствами [6] и многие другие. Существуют и другие работы в области взаимосвязи между технологией и структурой [7 – 8].

К сожалению, эти работы посвящены некоторым конкретным материалам и технологиям и не дают исследователю общей картины влияния структуры, не учитывают организационную структуру литейного производства, взаимовлияние перечисленных структур и многое другое.

Поэтому **целью настоящей работы** является повышение эффективности литейного производства путем создания метода управления качеством отливок, основанного на общей модели технико-организационного управления литейной технологией и единого метода оценки их чувствительности к изменениям структуры.

Основной материал работы. Разделим литейное производство на *материальные* (формовочные и вспомогательные материалы, литейные формы, отливки и т.п.), *технические* (технология, оборудование, инструмент) и *организационные* (менеджмент, персонал, стандарты, нормативы, документация, инструкции и пр.) ОЛП.

Схема взаимодействия материальных ОЛП на этапах проектирования и управления с качеством отливок представлена на рис. 1.

На рисунке, кроме перечисленных ОЛП, представлено также его турбулентное окружение. Турбулентность определяется, прежде всего, отклонениями реальных характеристик используемых материалов, энергоносителей и прочих компонентов процесса от проектных. Кроме того окружение влияет на процессов ОЛП через стохастические природные условия, брак, аварийные ситуации, а также через некомпетентные и недобросовестные действия персонала литейных

цехов [9]. В результате, например, в литейной форме могут появиться местные пере- или недоуплотнения, несплошности, другие дефекты анизотропности и пр., а в отливках – все известные виды брака.

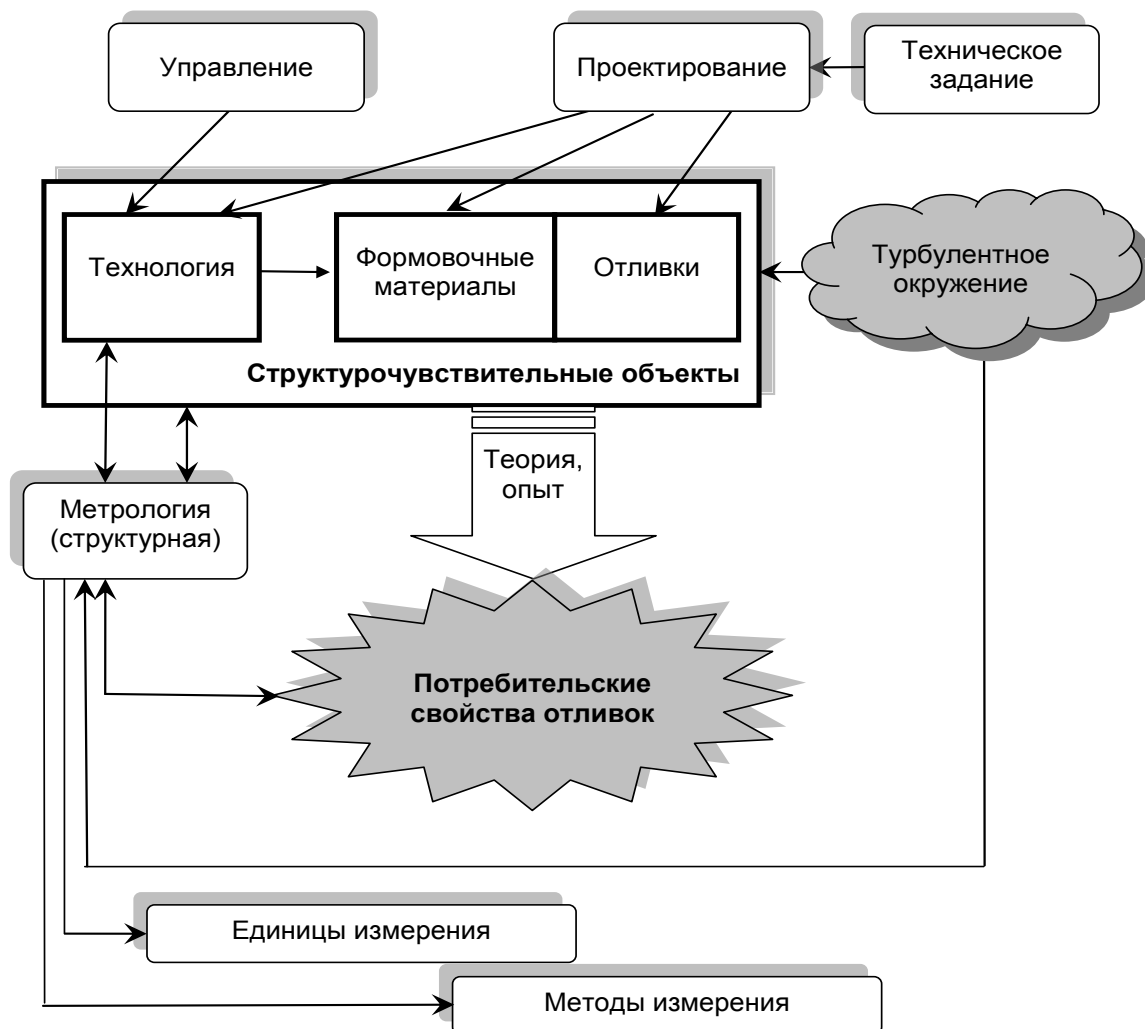


Рисунок 1 – Схема взаимодействия структуры материальных объектов литейного производства с САПР, АСУ, турбулентным окружением и потребительскими свойствами отливок

Важнейшей составляющей представленной схемы взаимодействия является метрологическая основа производства, развитие которой предопределяется новыми подходами к проектированию и анализу литейных технологий.

Для моделирования и количественной оценки структурной чувствительности материальных объектов использовали перколяционные модели, основанные на построении и анализе кластеров отдельных компонентов гетерогенных структур [10-12]. Такие модели позволяли

воспроизводить микро и макроособенности форм и отливок: поры, распределение связующего, добавки, различные технологические барьеры с переменной проницаемостью и многое другое.

Наличие перколяционного порога в процессе накопления добавок со свойствами, отличными от свойств основы, приводит при некоторой концентрации добавки к скачкообразному изменению свойств гетерогенной системы. При этом различные смеси в зависимости от переносимой субстанции (масса, электричество, тепло) ведут себя по-разному, например, достаточно одного электропроводного бесконечного кластера минимальной мощности, заместившего часть исходного неэлектропроводного кластера, чтобы изменить электропроводность на несколько порядков, что совершенно не характерно для теплопроводности.

Это объясняется существенным отличием электропроводности проводника и изолятора (миллионы раз) по сравнению с отличием в теплопроводности тех же материалов (единицы раз). Аналогичная причина приводит к резкому возрастанию проницаемости стенки после появления первой сквозной поры (кластера пор). Для того же, чтобы присутствие нового компонента стало заметным с точки зрения теплопроводности, нужно, чтобы его кластер (или кластеры) обладал заметной мощностью, что достигается введением нового компонента в концентрации, существенно превышающей перколяционный порог. Поэтому, при моделировании тепловых явлений в форме важными параметрами являются не только конечность кластеров, но и их мощность.

Таким образом, моделирование замещения компонентов с резко различными параметрами, значением которых у одного из компонентов можно пренебречь (например, газопроницаемостью сплошной стенки или электропроводностью хорошего изолятора), сводится к моделированию возникновения новых возможностей протекания там, где их раньше не было вообще.

На схеме, приведенной на рис. 2, показана типичная кривая изменения перколяционной характеристики формовочной смеси λ (например, теплопроводности) при добавлении в смесь с исходной теплопроводностью λ_1 второго компонента с характеристикой λ_2 .

На кривых такого рода можно выделить три характерных участка: $\Delta\alpha_1$ – добавка второго компонента практически не сказывается на перколяционной характеристике смеси, остающейся такой же, как и при $\alpha = 0$; $\Delta\alpha_2$ – «зона чувствительности» – добавка второго компонента приводит к изменению перколяционной характеристики от λ_1 до λ_2 ; $\Delta\alpha_3$ – добавка второго компонента практически не сказывается на перколяционной характеристике смеси, остающейся такой же, как и при $\alpha = 1$.

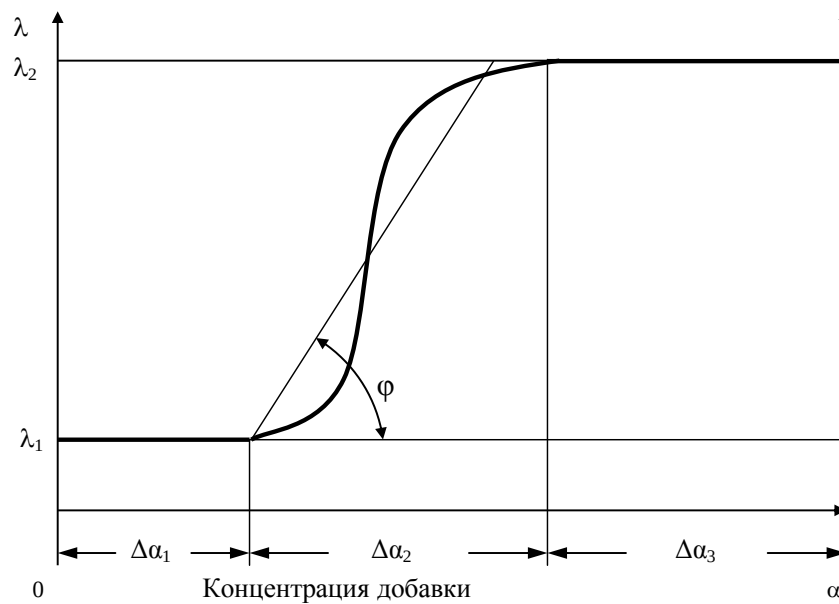


Рисунок 2 – Схема к анализу влияния разности коэффициентов протекания на ширину «зоны чувствительности»

Угол ϕ наклона прямой, аппроксимирующей кривую $\lambda(\alpha)$ на участке $\Delta\alpha_2$, однозначно связан с величиной «зоны чувствительности» и разницей в значениях перколяционных характеристиках компонентов соотношением:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\Delta\alpha_2} \quad (1)$$

Как показывает анализ реальных кривых $\lambda(\alpha)$ для различных свойств λ (теплопроводности, газопроницаемости, электропроводности) и различных компонентов смеси величина «зоны чувствительности» в значительной степени зависит также от разницы свойств $\lambda_2 - \lambda_1$. В настоящей работе такую зависимость искали в виде:

$$\Delta\alpha_2 = \frac{1}{K |\lambda_2 - \lambda_1| + 1} \quad (2)$$

При $\lambda_2 = \lambda_1$ $\Delta\alpha_2 = 1$, и изменение эффективной теплопроводности за счёт добавки не происходит (при прочих равных условиях). При $\lambda_2 \gg \lambda_1$ $\Delta\alpha_2 \rightarrow 0$, и изменение параметра переноса при образовании бесконечного кластера происходит практически скачком.

Определение величины K для конкретных составов и параметров представляет собой практическую задачу для пользователя системы перколяционного моделирования.

Схема взаимодействия технических и организационных ОЛП с потребительскими свойствами отливок представлена на рис. 3. Она включает два цикла воздействия: технический и организационный [9].

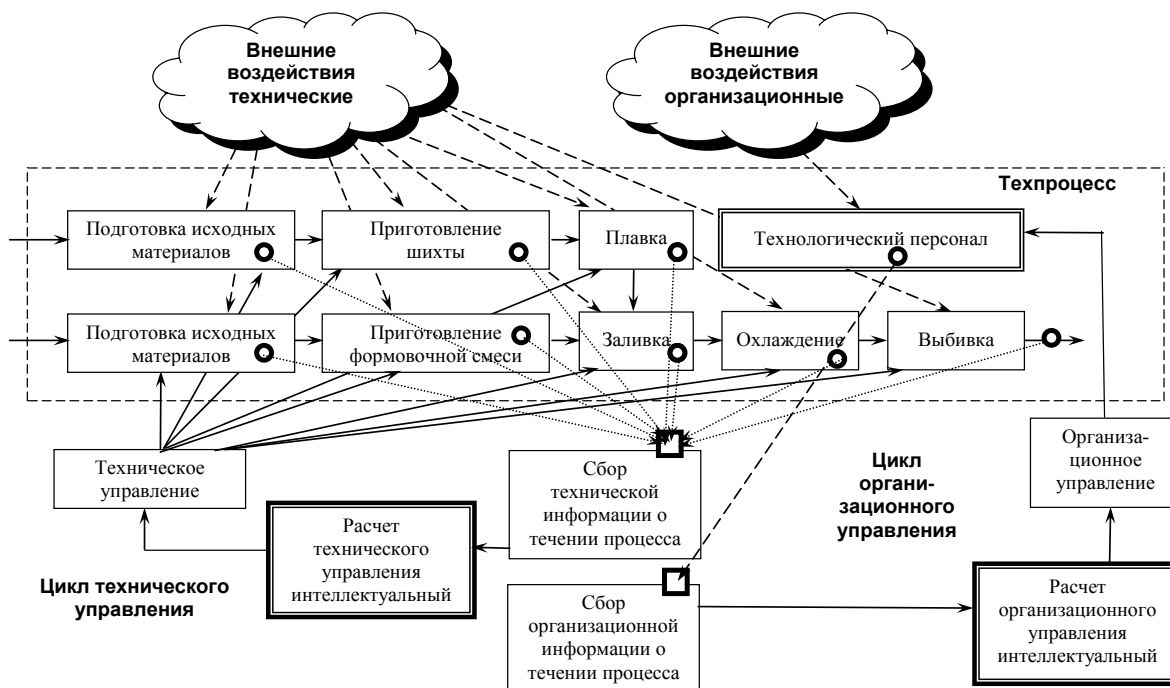


Рисунок 3 – Схема взаимодействия структуры технических и организационных объектов литейного производства с потребительскими свойствами отливок

Здесь построить модель взаимосвязи «объект литейного производства → структура → качество» значительно сложнее из-за отсутствия необходимой организационной информации или ее стохастичности, поэтому для моделирования на этом уровне использовали теорию фракталов. Для этого объекты литейного производства (ОЛП) рассматривали в качестве стохастических фракталов и ввели понятие *элемент объекта литейного производства* (ЭЛП). Сформулируем свойства такого ЭЛП:

- *самоподобие*: поскольку ЭЛП также являются фрактальным объектом, ему присуще свойство самоподобия: повторение фракталом самого себя на разных масштабных уровнях, т. е. неизменность закона построения фрактала; это означает, что основные атрибуты материалов,

оборудования и технологии ОЛП, распространяются не только на сам объект, но и все его ЭЛП;

– основные процессы ЭЛП: проектирование, изготовление, эксплуатация и списание представлены как в самом ОЛП, так и в любом его ЭЛП;

– основные понятия ЭЛП: качество, стоимость, экологичность и др., а также их взаимосвязи сохраняются как для ОЛП в целом, так и для его ЭЛП любого масштаба.

Использование фрактальной модели, с одной стороны, позволяет абстрагироваться от конкретного содержания ОЛП и всех его ЭЛП разного уровня и, с другой стороны, – использовать фрактальные характеристики ОЛП для оценки его структурной чувствительности [2, 13, 14]. В частности, в настоящей работе для этого использовали такую характеристику фракталов, как энтропийную фрактальную размерность.

Выводы. В работе предложены методы и модели оценивания структурной чувствительности всех компонентов литейного производства: материалов, оборудования, технологии и организации производства с точки зрения качества выпускаемых отливок и намечены пути развития автоматизированных систем проектирования и управления, а также метрологической базы литейных предприятий.

Список использованных источников: 1. Прокопович, И.В. Определение вероятности образования транзитной графитовой поры в структуре серого чугуна/ И.В.Прокопович, Ф.М.Грайжевский // Труды Одесского политехнического университета. –1997. –Вып. 1. –С. 25 –26. 2. Доний, А.Н. Фрактальные имитационные модели эволюции структуры материалов в процессе фазовых превращений/ А.Н. Доний, В.Ю. Алексеев // Сборник научных и методических трудов КПИ к 50-летию инженерно-физического факультета. Часть 2. –К.: КПИ, 1994. –С. 47 –51. 3. Становский, А.Л. Структурочувствительные формовочные материалы / А.Л. Становский, Г.В. Кострова, В.Н. Пурич // Моделирование в прикладных научных исследованиях. –Одесса: ОГПУ, 1998. – С. 14 –16. 4. Кострова, Г.В. Моделирование высокоинтенсивной теплопередачи через пористые среды с источником и стоком тепла / Г.В. Кострова, В.Н. Рубанович // Моделирование в научных исследованиях. –Одесса: ОГПУ, 1997. –С. 39 –41. 5. Балан, С.А. Перколяционный анализ структурочувствительных формовочных материалов / С.А. Балан, Г.В. Кострова, В.Н. Пурич // Труды ОПУ. –2000. –Вып. 1(10). –С. 8 –11. 6. Герега, А.Н. Бумажный фильтр как перколяционная система / А.Н. Герега, С.Н. Мороз // Применение вычислительной техники и математического моделирования в прикладных научных исследованиях. –Одесса: ОГПУ, 1995. –С. 39. 7. Пурич, В.Н. Технологические методы управления проницаемостью песчаных литейных форм/ В.Н. Пурич // Моделирование в прикладных научных исследованиях. –Одесса: ОГПУ, 1998. –С. 11 –12. 8. Кострова, Г.В. Управление свойствами структурочувствительных гетерогенных литейных материалов/ Г.В. Кострова, В.В. Новиков, В.Н. Рубанович // Труды ОПУ. –1998. –Вып. 1(5). –С. 8 –10. 9. Прокопович, И.В. Система интеллектуального мониторинга процесса литья / И.В. Прокопович, А.А. Коряченко, И.И. Становская // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. –Одеса, 2011. –Вип.

44. –С. 278 –282. **10.** Дульнев, Г.Н. Процессы переноса в неоднородных средах/ Г.Н. Дульнев, В.В. Новиков –Л.: Энергоатомиздат, 1991. –248 с. **11.** Становский, А.Л. Модельный эксперимент на взаимопроникающих кластерах замещения в литейной форме/ А.Л. Становский, В.Н. Пурич, А.Г. Онищенко // Труды ОПУ. –1999. –Вып. 1(7). –С. 8 –10. **12.** Лысенко, Т.В. Применение структурных идентификаторов в литейном производстве / Т.В. Лысенко, И.В. Прокопович, А.А. Коряченко. –Високі технології в машинобудуванні: збірник наукових праць. –Харків, НТУ «ХПІ», 2011. –Вип. 1(21). –С. 185 –190. **13.** Соколов, И.М. Размерности и другие геометрические критические показатели в теории протекания / И.М. Соколов // УФН. –1986. –Т.150. –Вып. 2. –С. 221 –255. **14.** Герега, А.Н. Моделирование переноса на макроуровне / А.Н. Герега, Г.В. Кострова, А.Л. Становский // Новые методы моделирования в машиностроении. –Одесса: ОАПНТИЭИ, 1993. –С. 8 –12.

Bibliography (transliterated): 1. Prokopovich, I.V. Opredelenie verojatnosti obrazovanija tranzitnoj grafitovoj pory v strukture serogo chuguna/ I.V.Prokopovich, F.M.Grazhevskij // Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta. –1997. –Vyp. 1. –S. 25 –26. 2. Donij, A.N. Fraktal'nye imitacionnye modeli jevoljucii struktury materialov v processe fazovyh prevrashhenij/ A.N. Donij, V.Ju. Alekseev // Sbornik nauchnyh i metodicheskikh trudov KPI k 50-letiju inzhenerno-fizicheskogo fakul'teta. Chast' 2. –K.: KPI, 1994. –S. 47 –51. 3. Stanovskij, A.L. Strukturochuvstvitel'nye formovochnye materialy / A.L. Stanovskij, G.V. Kostrova, V.N. Purich // Modelirovanie v prikladnyh nauchnyh issledovanijah. –Odessa: OGPU, 1998. –S. 14 –16. 4. Kostrova, G.V. Modelirovanie vysokointensivnoj teploperedachi cherez poristye sredy s istochnikom i stokom tepla / G.V. Kostrova, V.N. Rubanovich // Modelirovanie v nauchnyh issledovanijah. –Odessa: OGPU, 1997. –S. 39 –41. 5. Balan, S.A. Perkoljacionnyj analiz strukturochuvstvitel'nyh formovochnyh materialov / S.A. Balan, G.V. Kostrova, V.N. Purich // Trudy OPU. –2000. –Vyp. 1(10). –S. 8 –11. 6. Gerega, A.N. Bumazhnyj fil'tr kak perkoljacionnaja sistema / A.N. Gerega, S.N. Moroz // Primenenie vychislitel'noj tehniky i matematicheskogo modelirovanija v prikladnyh nauchnyh issledovanijah. –Odessa: OGPU, 1995. –S. 39. 7. Purich, V.N. Tehnologicheskie metody upravlenija pronicaemost'ju peschanyh litejnyh form/ V.N. Purich // Modelirovanie v prikladnyh nauchnyh issledovanijah. –Odessa: OGPU, 1998. –S. 11 –12. 8. Kostrova, G.V. Upravlenie svojstvami strukturochuvstvitel'nyh geterogennyh litejnyh materialov/ G.V. Kostrova, V.V. Novikov, V.N. Rubanovich // Trudy OPU. –1998. –Vyp. 1(5). –S. 8 –10. 9. Prokopovich, I.V. Sistema intellektual'nogo monitoringa processa lit'ja / I.V. Prokopovich, A.A. Korjachenko, I.I. Stanovskaja // Visnik Odes'koï derzhavnoï akademii budivnictva ta arhitekturi. –Odesa, 2011. –Vip. 44. –S. 278 –282. 10. Dul'nev, G.N. Processy perenosu v neodnorodnyh sredah/ G.N. Dul'nev, V.V. Novikov –L.: Jenergoatomizdat, 1991. –248 s. 11. Stanovskij, A.L. Model'nyj jeksperiment na vzaimopronikajushhijh klasterah zameshhenija v litejnoj forme/ A.L. Stanovskij, V.N. Purich, A.G. Onishhenko // Trudy OPU. –1999. –Vyp. 1(7). –S. 8 –10. 12. Lysenko, T.V. Primenenie strukturnykh identifikatorov v litejnom proizvodstve / T.V. Lysenko, I.V. Prokopovich, A.A. Korjachenko. –Visoki tehnologii v mashinobuduvanni: zbirnik naukovih prac'. –Harkiv, NTU «HPI», 2011. –Vip. 1(21). –S. 185 –190. 13. Sokolov, I.M. Razmernosti i drugie geometricheskie kriticheskie pokazateli v teorii protekanija / I.M. Sokolov // UFN. –1986. –T.150. –Vyp. 2. –S. 221 –255. 14. Gerega, A.N. Modelirovanie perenosu na makrourovne / A.N. Gerega, G.V. Kostrova, A.L. Stanovskij // Novye metody modelirovanija v mashinostroenii. –Odessa: OAPNTiJeI, 1993. –S. 8 –12.

УДК 536:621.9

А. В. УСОВ, д-р техн. наук,
С. Г. СМІРНИЙ, Одеса, Україна

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ И СПЛАВОВ, СКЛОННЫХ К ЭТОМУ ВИДУ ДЕФЕКТОВ

В статті запропоновано аналіз причин тріщиноутворення при шліфуванні матеріалів та сплавів, схильних до цього виду дефектів. Показано, що інтенсивність тріщиноутворення визначається наявністю різного роду неоднорідностей, які виникають у поверхневому шарі в залежності від технології виготовлення деталі. Одержані функціональні зв'язки технологічних параметрів і тріщиноутворення при шліфуванні матеріалів, схильних до цих дефектів.

В статье представлен анализ причин трещинообразования при шлифовании материалов и сплавов, склонных к этому виду дефектов. Показано, что интенсивность трещинообразования во многом определяется наличием различного рода неоднородностей, возникающих в поверхностном слое по ходу технологии изготовления детали. Получены функциональные связи технологических параметров с условиями трещинообразования при шлифовании материалов, предрасположенных к этому виду дефектов.

The article presents an analysis of the causes of crack formation in grinding of materials and alloys are prone to this type of defects. It is shown that the intensity of cracking is largely determined by the presence of various inhomogeneities that occur in the surface layer during the manufacturing details. The obtained functional relationships of process parameters with the conditions of crack formation in grinding of materials that are predisposed to this type of defects.

1. Введение

Качество поверхностного слоя обрабатываемых деталей формируется под действием термомеханических явлений, сопровождающих финишные операции. Отличительной особенностью операции шлифования является выделение большого количества теплоты, основная часть которой воспринимается обрабатываемой деталью и вызывает на отдельных её участках структурные изменения – прижоги. Эти дефекты способствуют уменьшению исходной твёрдости поверхности, образованию растягивающих остаточных напряжений, снижают контактную выносливость, усталостную прочность деталей [1–3].

Установление связей между важнейшими эксплуатационными свойствами деталей (длительная прочность, контактная жесткость, магнитные свойства и др.) и технологическими параметрами – режимами обработки, характеристиками инструмента, микротвердостью, наличием прижогов, микротрещин, сколов, глубиной распространения упрочненного слоя представляет собой одну из важнейших задач технологии машиностроения [2, 3, 4].

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В фундаментальных работах [1–4] в качестве основного показателя физико-механического состояния обрабатываемых поверхностей используется теплонапряженность процесса шлифования.

Для большой группы металлов и сплавов не подверженных структурным превращениям в процессе обработки их шлифованием характерным видом брака являются дефекты типа трещин, существенно снижающие эксплуатационные свойства изделий.

Поэтому задача определения технологических условий бездефектного шлифования и управления качеством поверхностного слоя изделий, из материалов склонных к трещино- и сколообразованию является весьма актуальной. Это предопределяет необходимость изучения механизма формирования шлифовочных дефектов.

Имеющиеся в настоящее время модели тепловых процессов алмазно-абразивной обработки получены в предположении однородности шлифуемых материалов и не учитывают наличие дефектов

технологической наследственности изделий. Изучению причин образования шлифовочных дефектов-трещин - посвящены работы [2, 3, 5, 6, 7, 8, 9] и др. в которых напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя детали рассматривается, в основном, с качественной стороны или оценивается в каждом отдельном случае экспериментальными методами.

Феноменологический подход в изучении причин трещинообразования материалов склонных к этому виду дефектов не позволяет вскрыть механизм зарождения и развития шлифовочных трещин.

Интенсивность появления трещин во многом определяется наличием различного рода неоднородностей, возникающих в поверхностном слое по ходу технологии изготовления детали. Особенно опасными с точки зрения зарождения трещин, являются такие наследственные дефекты, как флокены, остроконечные полости, инородные включения.

При постановке задачи о повышении качества шлифования деталей возникает проблема оценки влияния неоднородностей, выбора режимов и характеристик инструмента, смазочно охлаждающей среды использование которых исключает прижого- и трещинообразование на обрабатываемых поверхностях. В связи с этим необходимо разработать предпосылки для оптимизации термомеханического состояния поверхностного слоя с учетом его дефектности, исключаящие возникновение шлифовочных дефектов типа трещин и прижогов.

3. Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является разработка методов и нормативных рекомендаций по технологическим методам снижения шлифовочных трещин при обработке деталей из материалов и сплавов, поверхностный слой которых имеет наследственные неоднородности структурного или технологического происхождения .

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- разработать математическую модель, описывающую термомеханические процессы в поверхностном слое при шлифовании

деталей из материалов и сплавов с учетом их неоднородностей, влияющих на формирование шлифовочных трещин и определить критерии дефектообразования;

- создать методику выбора технологических условий шлифования материалов, имеющих наследственные неоднородности, обеспечивающих требуемые показатели качества;

- разработать рекомендации по выбору технологических условий бездефектной обработки шлифованием изделий из материалов, особо предрасположенных к трещинообразованию.

4. Моделирование термомеханических явлений при шлифовании материалов с учетом неоднородностей в их поверхностном слое

При выборе и обосновании математической модели учитывалось, что процесс шлифования деталей сопровождается как тепловыми, так и механическими явлениями. Однако преобладающее воздействие на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя оказывают температурные поля. При составлении расчетной схемы (рис.1) допускается, что деталь типа заготовок может быть представлена в виде кусочно-однородных условных слоев, с разными свойствами, расположенных на основном материале-матрице, что позволяет изучать термомеханические процессы при шлифовании деталей с несколькими типами покрытий, толщиной Δa_k наносимых на основной материал. Такая схема предопределяет тепловые и деформационные условия сопряжения слоев по границам их раздела - a_k .

Влияние неоднородностей в виде фазовых превращений неустойчивых структур, межзеренных плёнок, границ кон тура наследственных аустенитных зёрен, карбидной строчечности, неметаллических включений, раковин, флокенов и др. дефектов, возникающих в поверхностном слое по ходу технологического процесса, учитывается в модели наличием в поверхностном слое включений и дефектов в виде условных трещин (рис. 1).

Система уравнений, определяющих тепловое и напряженно-деформированное состояние при шлифовании поверхности деталей с k -покрытиями, верхний слой которых имеет неоднородности типа

включений(неправильной округлой формы) и микротрещин (эллипсоидальной формы с большей полуосью L), содержит [6, 7]:

Уравнение нестационарной теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad \begin{matrix} 0 \leq x < \infty; \\ -\infty < y < \infty. \end{matrix} \quad (1)$$

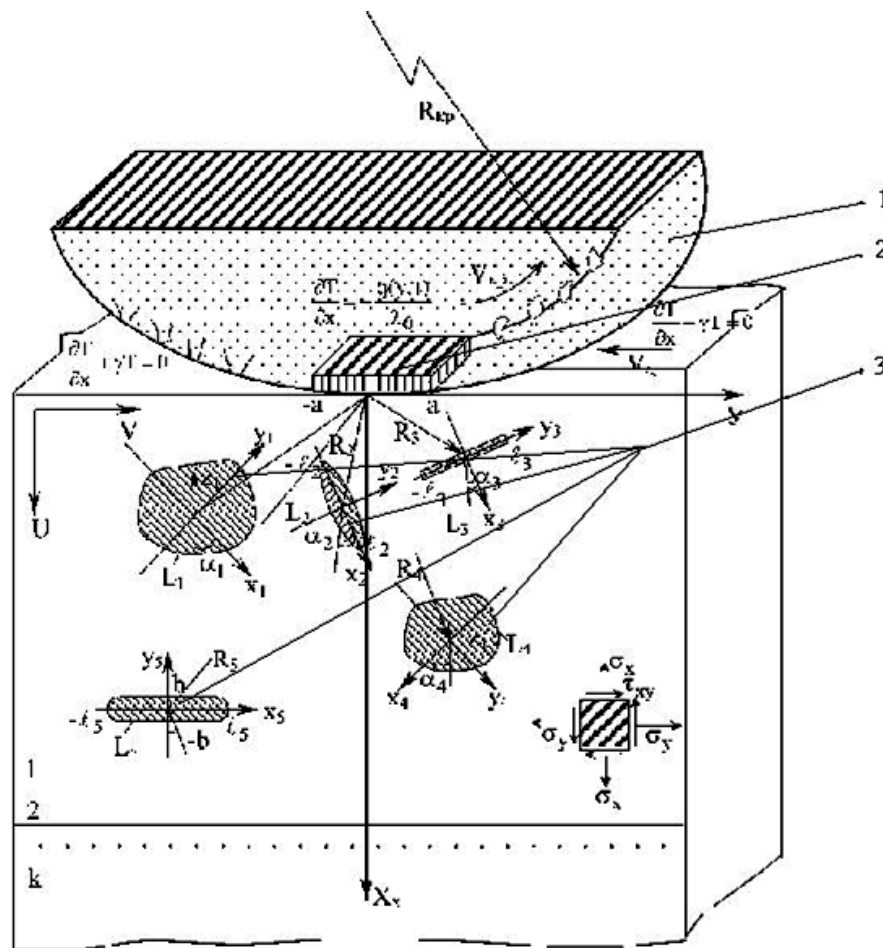


Рисунок 1 – Расчетная схема для моделирования влияния технологических неоднородностей на трещинообразование при шлифовании материалов, склонных к данным дефектам:

- 1 – шлифовальный круг радиуса $R_{кр}$;
- 2– зона контакта круга с обрабатываемой поверхностью;
- 3– поверхностный слой, содержащий наследственные дефекты с указанием их характерных размеров L_i и углов ориентации α_i локальных координат;
- k –слой, в котором исследуются термомеханические процессы ($k= 1,2,...$)

Уравнение упругости Ламе в перемещениях

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x} \frac{1}{1-2\mu} + \Delta \bar{v} = B^T \frac{\partial T}{\partial x}; \quad \bar{v}(x, y) = \frac{v}{2G}; \quad \bar{v}(x, y) = \frac{v}{2G}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x} \frac{1}{1-2\mu} + \Delta \bar{v} = B^T \frac{\partial T}{\partial y}; \quad B^T = \frac{4G(1+\mu)}{1-2\mu} a_k; \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \quad (3)$$

где: $T(x, y, \tau)$ – температура в точке с координатами (x, y) и в любой момент времени τ ; a – температуропроводность материала; a_t – температурный коэффициент линейного расширения; μ, G – постоянные Ламе; u, v – компоненты вектора перемещений точки (x, y) ; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ – оператор Лапласа.

Начальные условия для данной задачи можно взять в виде:

$$T(x, y, 0) = 0 \quad (4)$$

Граничные условия для температурных и деформационных полей, учитывающие теплообмен с поверхности вне зоны контакта круга с деталью и интенсивного тепловыделения в зоне обработки имеют вид:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{q(y, \tau)}{\lambda}, |y| < a^*, -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \gamma T = 0, |y| > a^* \quad (5)$$

$$\sigma_x(x, y, \tau)|_{x=0} = \tau_{xy}(x, y, \tau)|_{x=0} = 0, \quad (6)$$

где: $q(y, \tau)$ – интенсивность теплового потока, формирующегося в результате взаимодействия круга с деталью; λ – коэффициент теплопроводности шлифуемого материала; $2a^*$ – длина зоны контакта круга с обрабатываемой поверхностью; γ – коэффициент теплообмена с окружающей средой; σ_x, τ_{xy} – нормальные и касательные напряжения.

Условия сопряжения слоёв (покрытий):

для температурных полей

$$T(a_k - 0, y, \tau) = T(a_k + 0, y, \tau)$$

$$\lambda_{k-q} \frac{\partial T}{\partial x}(a_k - 0, y, \tau) = \lambda_k \frac{\partial T}{\partial x}(a_k + 0, y, \tau)$$

для деформационных полей

$$v_j(a_k - 0, y) = v_j(a_k + 0, y)$$

$$\sigma_x(a_k - 0, y) = \sigma_x(a_k + 0, y);$$

$$\tau_{xy}(a_k - 0, y) = \tau_{xy}(a_k + 0, y) \quad (7)$$

где λ_k - теплопроводность k -го слоя; α_k - толщина k -го слоя; v_j - компоненты перемещений в k -ом слое.

Для поверхностных слоёв, имеющих структурные и технологические неоднородности, условия разрывности решения в зависимости от типа дефекта будут:

на включениях

$$\langle \bar{v} \rangle = 0, \langle \sigma_x \rangle \neq 0$$

$$\langle \bar{v} \rangle = 0, \langle \tau_{xy} \rangle \neq 0$$

на трещиноподобных дефектах

$$\langle \sigma_x \rangle = 0, \langle \bar{v} \rangle \neq 0$$

$$\langle \tau_{xy} \rangle = 0, \langle \bar{v} \rangle \neq 0 \quad (8)$$

где $\langle \bar{v} \rangle, \langle \bar{v} \rangle, \langle \sigma_x \rangle, \langle \tau_{xy} \rangle$ - скачки компоненты смещений и напряжений.

Предельно равновесное состояние деформируемого поверхностного слоя оценивалось классическими критериями прочности.

Из имеющихся критериев разрушения, учитывающих локальные физико-механические свойства неоднородных материалов, наиболее приемлемыми для данного случая являются критерии силового подхода, связанные с использованием понятия коэффициента интенсивности напряжений /КИН/. Когда нагружение приводит к тому, что интенсивность напряжений K_I становится равной предельному значению K_{Ic} , то трещинообразный дефект превращается в магистральную трещину.

Моделирование влияния исходной кусочной однородности шлифуемых материалов /деталей с покрытиями/ на термомеханические процессы осуществляется методом разрывных решений [10]. Решение тепловой задачи (1) – (4), (5) – (8) осуществляется с помощью интегральных преобразований Фурье по переменной y и Лапласа по τ к

функции $T(x, y, \tau)$ в I ($k=0$) слое, которые описываются в интегральной форме в виде:

$$T_0(x, y, \tau) = \int_{-a}^a d\tau \int_0^\tau \chi(t - \tau, x, y - \eta) dt, \quad (9)$$

где $q(t, x, y - \eta) = \frac{1}{2\pi i} \int_r K_p^m(y - \eta, x) e^{pt} dp$, $\chi(y, \tau) = \sum_{m=0}^{\infty} \chi_m(y) 2e^{-\tau} L_m(2\tau)$, $L_m(2\tau)$ –

полиномы Лаггера; $K_p^m(y - \eta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-t\beta(y-\eta)}}{l_{m1}\beta p}$, $l_{m1}\beta p$ – выражение, учитывающее теплофизические свойства слоёв $k=0-m$, их толщину и граничные условия.

Напряженно-деформированное состояние слоистой полуплоскости также оценивается методом разрывных решений. Границы раздела $x = a_k$ ($k=0$) рассматриваются как дефекты, при переходе через которые терпят разрывы поля смещений и напряжений.

Построение разрывных решений уравнений Ламе с заданными скачками осуществляется с помощью функций Треффца:

$$\bar{u} = \psi_1 + (x - a)\psi'_0, \quad \bar{v} = \psi_2 + (x - a)\psi'_0; \quad \psi'_0 = \frac{\psi'_1 + \psi'_2}{3 - 4\nu}, \quad e = \psi'_1 + \psi''_2 + \psi'_0, \quad (10)$$

где: $\Delta\psi_0(x, y) = 0$, $\Delta\psi_j(x, y) = b'_k T^{(j)}$, ($j=1, 2$) “ ‘ ” $\frac{\partial}{\partial x}$, “ ’ ” $\frac{\partial}{\partial y}$

Напряжения находят по формулам:

$$\sigma_x = (1 - \mu)\psi'_0 + \psi'_1 + (x - a_k)\psi''_0; \quad \sigma_y = \mu\psi'_0 + \psi'_2 + (x - a_k)\psi''_0 \quad (11)$$

$$\tau_{xy} = \psi_1^2 + 2(x - a_k)\psi'_0 + \psi'_2 + \psi_0'$$

Применение обобщенных преобразований Фурье по переменным x, y к уравнениям (2), (3), (6), (7) с учетом [10] позволяет получить рекуррентные соотношения, связывающие смещения и направления в произвольном слое с напряжениями и смещениями, формирующимися в первом слое под действием нестационарных температурных полей.

Влияние неоднородностей в поверхностном слое сталей и сплавов на интенсивность трещино- и сколообразования при шлифовании исследуется следующим образом. В условиях неравномерного нагрева в поверхностном

слое возникают тепловые деформации, которые вызывают температурные напряжения. Под действием этих напряжений, концентрирующихся в местах расположения дефектов, и происходит образование шлифовочных трещин. Математически задача формулируется так. Пусть в упругой полуплоскости на линиях $\tilde{x}_i = 0$ имеются дефекты $\left| \tilde{y}_i \right| \leq l_i, (i = \overline{1, k})$, при переходе через которые терпят разрывы поля смещений и напряжений:

$$\begin{aligned} \left\langle \tilde{v}(\tilde{y}) \right\rangle &= \tilde{v}_k(-0, \tilde{y}) - \tilde{v}_k(+0, \tilde{y}); & \left\langle \tilde{\sigma}_x^k(\tilde{y}) \right\rangle &= \tilde{\sigma}_x^k(-0, \tilde{y}) - \tilde{\sigma}_x^k(+0, \tilde{y}); \\ \left\langle \tilde{u}(\tilde{y}) \right\rangle &= \tilde{u}_k(-0, \tilde{y}) - \tilde{u}_k(+0, \tilde{y}); & \left\langle \tilde{\tau}_{xy}^k(\tilde{y}) \right\rangle &= \tilde{\tau}_{xy}^k(-0, \tilde{y}) - \tilde{\tau}_{xy}^k(+0, \tilde{y}). \end{aligned} \quad (12)$$

В зависимости от типа дефектов реализуются граничные условия (8) первого типа, либо второго. Будем различать левый /находящийся при движении по l_i в положительном направлении/ и правый берега дефектов, обозначая относящиеся к ним величины индексами “+” и “-“. Решение задачи термоупругости (2), (3), (6), (8) для поверхностного слоя, содержащего указанные дефекты при условии, что температурное поле описывается выражением (9) сводится к решению системы сингулярных интегральных уравнений относительно скачков смещений $\left\langle \tilde{u}'_k(\tilde{y}) \right\rangle$, $\left\langle \tilde{v}'_x(\tilde{y}) \right\rangle$ – в случае трещин, и скачков напряжений $\left\langle \tilde{\sigma}_x^k(\tilde{y}) \right\rangle$, $\left\langle \tilde{\tau}_{xy}^k(\tilde{y}) \right\rangle$ в случае включений:

$$\int_{-l_i}^{l_i} \frac{\left\langle \tilde{u}'_1(\eta) \right\rangle}{y - \eta} d\eta + \sum_{k=1-l_k}^S \int_{-l_k}^{l_k} \left[\left\langle \tilde{u}'_1(\eta) \right\rangle K_k^{(1)}(d, y - \eta) + \left\langle \tilde{v}'_1(\eta) \right\rangle M_k^{(1)}(d, y - \eta) \right] d\eta = F_1; \quad (13)$$

В этих формулярах приняты следующие обозначения: $K_k^{(i)}(d, y - \eta)$; $M_k^{(i)}(d, y - \eta)$ – ядра, отражающие размещение и ориентацию дефектов, относительно глобальных координат XOY; d^* – параметр, характеризующий физико-механические свойства материала поверхностного слоя.

Вычисление регулярных интегралов в (13) производятся по квадратурным формулам Гаусса-Чебышева, а сингулярных интегралов с

ядрами Коши – методом ортогональных многочленов [10]. При этом получаем систему алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов. Окончательно, находим напряжения и смещения в поверхностном слое с дефектами l_k по формулам:

$$\|\sigma_x, \tau_{xy}, u', v'\| = \sum_{k=1-l_k-l_k}^n \int_{-l_k}^{l_k} \|R_k^{(m)}[(x-\xi), y]\| P^{(i)}(\xi) d\xi, \quad R_k^m(x, y) = -(\alpha_k)^m v_k^{(m)} [K_n^{(S_k-m)}], \quad m=0,1,$$

$$K_n^{(0)}(x, y) = \frac{(-sqny)^n |y|}{4\pi(x^2 + y^2)} \left[\frac{y^2 - x^2}{y^2 + x^2} - (n-1) \right], \quad n=0,1,2...$$

$$K_n^{(1)}(x, y) = \frac{(-sqny)^n x}{4\pi(x^2 + y^2)} \left[\frac{2y^2}{x^2 + y^2} - (n-1) \right]. \quad (14)$$

Наибольший интерес представляет поведение напряжений в окрестности вершин дефектов типа трещин, остроконечных включений, структурных несовершенств, т.е. особенностей напряжений при $y \rightarrow \pm l_k$. Характер поля напряжений в непосредственной близости от конца дефекта, полученного в рамках классической теории упругости, определяется коэффициентами интенсивности напряжений $K_I + iK_{II}$.

Так, исследование интенсивности напряжений в вершинах дефекта длиной $2l$, расположенного на глубине σ^* , когда на поверхности тела $/x=0, |y| \leq a^*/$ задан тепловой поток q , позволило установить предельное значение этого потока q^* при котором указанный дефект начинает развиваться в магистральную трещину:

$$q^* = \frac{2\sqrt{3}\lambda(1-\nu)K_{4C}}{\alpha_2 El \sqrt{\pi l} \sigma^*}. \quad (15)$$

Для бездефектной обработки сталей и сплавов, имеющих трещиноподобные дефекты и включения, при выборе режимов обработки и характеристик инструмента следует руководствоваться предельными значениями теплового потока [11, 12], формирующегося при шлифовании, чтобы наследственные дефекты не вышли из равновесного состояния.

Из установленных функциональных связей между кинетикой термомеханических явлений, наследственной неоднородностью поверхностного слоя и показателями качества шлифуемых изделий следует, что тепловой поток является основным критерием предельного равновесия трещиноподобных дефектов [11, 12].

Влияние конструктивных параметров инструмента на термомеханическое состояние поверхностного слоя определялось с помощью модельной задачи (1), (4), и граничных условий в виде:

$$q(y, \tau) = \frac{c\sqrt{\tau}}{\lambda} [H(y) - H(y - 2a^*)] \sum_{k=0}^n \sigma(y + kl - v_{kp}\tau) \quad (16)$$

где $H(y)$ – функция Хевисайда; $\sigma(y)$ – дельта-функция Дирака; n – количество зерен, проходящих в зоне контакта за время $\tau = \frac{\sqrt{\pi t_{\text{шт}}}}{v_{kp}}$; λ – теплопроводность материала изделия; $c\sqrt{\tau}$ – тепловой поток от единичного зерна; $v_g, v_{kp}, t_{\text{шт}}$ режимы шлифования, $2a^*$ – длина дуги контакта круга с деталью; l^* – расстояние между режущими зернами. Получены теоретически и подтверждены экспериментально максимальные значения мгновенной температуры T_M , от единичных зерен к постоянной составляющей $-T_K$, которые использованы в дальнейшем в качестве критериальных при прогнозировании условий образования дефектов типа прижогов и глубины их залегания.

5. Рекомендации по методике бездефектной технологии шлифования изделий из материалов, особо предрасположенных к трещинообразованию

Апробация теоретических результатов по обеспечению качества шлифуемых поверхностей, содержащих неоднородности проводилась на материалах, склонных к трещинообразованию и существенно отличающихся между собой физико-механическими свойствами – это изделия с покрытиями, магнитотвердые сплавы и высокопрочные стали.

Широко применяемые в машиностроении покрытия рабочих поверхностей деталей – молибденовые, плазменные, боридные – характеризуются очень высокой твердостью и хрупкостью. При обработке

этих покрытий шлифованием самыми распространенными дефектами являются трещины, сколы, срывы [12].

Существующие модели напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя деталей с покрытием являются не полными, в связи с принятием при их построении таких допущений как гипотеза об однородности самого покрытия [2]. В то время, как анализ изломов деталей с покрытиями показывает, что местами зарождения трещин являются микронеоднородности покрытий, обусловленные как характером самих покрытий, так и технологией их нанесения.

Изучение роли неоднородности структуры покрытий в механизме снижения трещиностойкости проводилось с помощью установленного теоретическим путем критерия локального разрушения в виде следующего неравенства:

$$l_0 < \frac{Da\lambda^2 v_q^u K_c^2}{\pi^2 \left[c v_{kp} G(1+\nu) a_t \left(1 - 2\chi p \left(\frac{v_q \sqrt{Dt}}{a\tau} \right) \right) \right]} \quad (17)$$

где v_{kp}, v_q, t режимы шлифования; D, C – параметры инструмента; λ, a – теплофизические характеристики обрабатываемого покрытия; K_c – трещиностойкость данного покрытия; G – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; a_t – температурный коэффициент линейного расширения; l – характерный линейный размер структурного параметра (дефект структуры).

Для плазменных покрытий на основе карбид титана TiC в качестве параметра l выбирались размеры воздушных пор, величина которых регулируется скоростью транспортирующей струи.

Исследование влияния технологической наследственности на процесс трещинообразования при шлифовании магнитотвердых сплавов проводилось на основе полученных критериев, отражающих особенности метода плавки, режимов ТО, ТМО и формирующейся при этом морфологии самих сплавов.

Качество обрабатываемых поверхностей будет обеспечено, если с помощью управляющих технологических параметров подобрать такие режимы обработки, смазочно-охлаждающие среды и характеристики

инструмента, что текущие значения температуры шлифования $T(x, y, \tau)$ и теплового потока $q(y, \tau)$, напряжений $\sigma(M)$ и сил шлифования P_y, P_z коэффициента K_{lc} будут превосходить своих предельных значений [12].

Реализация системы ограничивающих неравенств по величинам самой температуры и глубине её распространения в виде:

$$T(x, y, \tau) = \frac{C}{2\pi\lambda} \sum_{k=0}^n H\left(\tau - \frac{kl}{v_{kp}}\right) H\left(\frac{L+kl}{v_{kp}}\right) \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} f(x, y, \tau, \tau') d\tau' \leq [T]_M \quad (18)$$

$$T([h], 0, \tau) = \frac{C}{2\pi\lambda} \sum_{k=0}^n H\left(\tau - \frac{kl}{v_{kp}}\right) H\left(\frac{L+kl}{v_{kp}}\right) \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \psi(x, \tau, \tau') d\tau' \leq [T]_{c.n.} \quad (19)$$

$$T_k(0, y, \tau) = \frac{C v_{kp}}{\pi \lambda l \sqrt{v_g}} \int_{a-e}^{\tau} \int_{-e}^e \frac{\chi(\eta, t) e^{\frac{(y-\eta)^2}{4(\tau-t)}}}{2\sqrt{\pi(\tau-t)}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi(\tau-1)}} + \gamma e^{\gamma^2(\tau-t)} [1 + \Phi(\gamma\sqrt{\tau-t})] \right\} d\eta dt \leq [T] \quad (20)$$

$$T_k^{\max}(L, 0) = \frac{C v_{kp} \alpha}{\lambda l v_q^2} \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \left[1 - \exp\left(-\frac{v_q \sqrt{Dt_{\text{ши}}}}{\alpha}\right) \right] \leq [T]. \quad (21)$$

позволяет избежать образования шлифовочных прижогов и может послужить основой для проектирования циклов шлифования по тепловому критерию.

Обработку материалов и сплавов без шлифовочных трещин можно обеспечить, если ограничить формирующиеся в зоне интенсивного охлаждения напряжения предельными значениями:

$$\sigma_{\max}(x, \tau) = 2G \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_t T_k \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}}\right) \leq [\sigma_{\text{лч}}]. \quad (22)$$

В случае доминирующего влияния наследственной неоднородности на интенсивность образования шлифовочных трещин, необходимо пользоваться критериями, в структуру которых входят детерминированные связи технологических параметров и свойства самих неоднородностей. В качестве таких можно использовать ограничение коэффициента интенсивности напряжений:

$$K = \frac{1}{\pi\sqrt{l}} \int_{-e}^e \sqrt{\frac{l+t}{l-t}} \{\sigma_x, \sigma_y\} dt \leq K_{lc} \quad (23)$$

или обеспечение с помощью управляющих технологических параметров предельного значения теплового потока, при котором сохраняется равновесие структурных дефектов:

$$q^* = \frac{P_z \nu_{kp} \alpha_s}{\sqrt{Dt_{un}}} \leq \frac{\sqrt{3} \lambda K_{lc}}{Hl \sqrt{\pi l} \sigma}. \quad (24)$$

Условия бездефектного шлифования можно реализовать, используя информацию о структуре обрабатываемого материала. Так, в случае преобладающего характера структурных несовершенств длиной $2l$, их регулярного расположения относительно зоны контакта инструмента с деталью, можно в качестве критериального соотношения использовать условие равновесия дефекта в виде:

$$l_0 < \frac{K_c^2}{x[GT_k(1+\nu)\alpha_t]^c}. \quad (25)$$

В этой формуле технологическая часть содержится в связи величины контактной температуры T_k с условиями шлифования.

На основе полученных критериальных соотношений (18)–(25), построен алгоритм обеспечения качества поверхностного слоя деталей при шлифовании с учётом максимальной производительности обработки.

6. Вывод

Изучен механизм формирования дефектов в поверхностном слое деталей из материалов и сплавов, предрасположенных к трещинообразованию при обработке их шлифованием с учетом предшествующих операций и возникающих при этом наследственных неоднородностей. Установлено, что шлифовочные трещины имеют тепловую природу, поэтому в качестве критериев бездефектной обработки необходимо выбирать тепловые критерии. При этом впервые получены расчетные зависимости между критерием трещиностойкости и основными управляющими технологическими параметрами. По известным

характеристикам наследственных дефектов определены предельные значения теплового потока, обеспечивающие требуемое качество шлифуемых поверхностей.

Список использованных источников: 1. Якимов А. В. Теплофизика механической обработки / А. В. Якимов, П. Т. Слободяник, А. В. Усов. – К.; Одесса: Лыбидь, 1991. – 240 с. 2. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М. "Машиностроение", 1981. – 279 с. 3. Сипайлов, В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В. А. Сипайлов. – М., "Машиностроение", 1978. – 167 с. 4. Ящерицын, П. И. Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Мн., "Наука и техника", 1977. – 256 с. 5. Jacobus, K. Machining-Induced residual stress: Experimentation and modeling / K. Jacobus, R. E. Devor, S. G. Kapoor // Transaction of the ASME: Journal of manufacturing science and engineering. – 2000. – Vol. 122, Issue 1. – P. 20–31. doi: 10.1115/1.538906. 6. Усов, А. В. Возникновение трещин при алмазно-абразивной обработке сталей / А. В. Усов, Г. Д. Григорьян. – Ж. "Сверхтвердые материалы", № 6, К., Наукова думка, 1982. – С. 43–55. 7. Усов, А. В. Причины появления дефектов при шлифовании магнито-твердых сплавов / А. В. Усов, Е. А. Кормилицына, Ф. М. Сальковский // Ж. Технология электротехнического производства. – 1982. – Вып. 4. – С. 1–3. 8. Усов, А. В. Анализ условий возникновения шлифовочных трещин и пути их устранения / А. В. Усов, А. В. Якимов, Г. Д. Григорьян // Ж. Вестник машиностроения. – 1980. – № II. – С. 27–31. 9. Худобин, Л. В. Технология обработки высокоэффективных магнитных сплавов / Л. В. Худобин, А. И. Бударин, Ф. М. Сальковский. – М., Энергия, 1979. – 184 с. 10. Попов, Г. Я. Концентрация упругих напряжений возле штампов, разрезов, тонких включений и подкреплений / Г. Я. Попов. – М.: Наука, 1982. – 344 с. 11. Подзей, А. В. Шлифовочные дефекты и пути их устранения / А. В. Подзей, А. В. Якимов // Ж. "Вестник машиностроения". – 1972. – № 3. – С. 41–43. 12. Усов, А. В. Повышение эффективности процесса бездефектного шлифования материалов и сплавов, предрасположенных к трещинообразованию : Дис. ... д-р. техн. наук / А. В. Усов. – К., 1991. – 426 с.

Bibliography (transliterated): 1. Jakimov, A. V., Slobodnyk, P. T., Usov, A. V. (1991). The physics of machining. Kyiv, Odessa, Libid, 240. 2. Resnikov, A. N. (1981). Physics of thermal processes of tooling of materials. Moscow: "Maschinostroenie", 279. 3. Sipaylov, V. A. (1978). Thermal processes at polishing and management by quality of surface. Moscow: "Maschinostroenie", 167. 4. Jasherichin, P. I., Rigov, E. V., Averchenkov, V. I. (1977). Technological heredity is in the structure of machines. Mn. "Scitech", 256. 5. Jacobus, K., Devor, R. E., Kapoor, S. G. (2000). Machining-Induced residual stress: Experimentation and modeling. Transaction of the ASME: Journal of manufacturing science and engineering, 122

(1), 20–31. doi: 10.1115/1.538906 6. Usov, A. V., Grigorjn, G. D. (1982). Origin of cracks at diamond-abrasive treatment of metals. J "Adamantine materials", 6, 43–55. 7. Usov, A. V., Kormilicina, E. A., Salkovskiy, F. M. (1982). Reasons of appearance of defects at polishing of magnetic carboloies. J. Technology of electrical engineering production, 4, 1–3. 8. Usov, A. V., Jakimov, A. V., Grigorjn, G. D. (1980). Analysis of terms of origin of polishing cracks and way of their removal. J. Announcer of engineer, II, 27–31. 9. Chudobin, L. V., Budarin, A. I., Salkovskiy, F. M. (1979). Technology of treatment of high-efficiency magnetic alloys. Publishing house Saratov Universitet, 128. 10. Popov, G. J. (1982). The elastic stress concentration near stamps, cuts, thin inclusions and reinforcements. Moscow: Nauka, 344. 11. Podsey, A. V., Jakimov, A. V. (1974). Polishing defects and ways of their removal. J. "Maschinostroenie", 41–43. 12. Usov, A. (1991). Improving the efficiency of the process defect-free grinding of materials and alloys that are prone to crack formation. Kiev, 324.

УДК621.9.06.-229.331

О.О. ЯКИМОВ, д-р техн. наук,
Л.В. БОВНЕГРА, канд. техн. наук,
І.Т. КОРНЕЩУК, Одеса, Україна

РОЗРАХУНОК ГЛИБИНИ ДЕФЕКТНОГО ШАРУ, ЩО УТВОРЮЄТЬСЯ ПРИ ЗУБОШЛІФУВАННІ ТАРІЛЬЧАСТИМИ КРУГАМИ

Отримана формула, по якій можна розраховувати глибини проникнення припиків, що утворюються при багатопрохідному зубошліфуванні суцільними і переривчастими абразивними кругами. Запропонована формула може бути використана технологом для проектування переходів зубошліфування на верстатах, що працюють тарільчастими абразивними кругами за методом огинання.

Получена формула, по которой можно рассчитывать глубины проникновения прижогов, образующихся при многопроходном зубошлифовании сплошными и прерывистыми абразивными кругами. Предложенная формула может быть использована технологом для проектирования переходов зубошлифования на станках, работающих тарельчатыми абразивными кругами по методу огибания.

A formula, on which it is possible raschityvat' depths of penetration of prizhogov, appearing at multipass zuboshlifovanii continuous and irregular abrasive circles, is got. The offered formula can be used a technologist for planning of transitions of zuboshlifovaniya on machine-tools, workings tarel'chatymi abrasive circles on the method of rounding.

Постанова проблеми. Відомо [6], що припик, що утворився при шліфуванні сталі 12Х2Н4А і що поширився на глибину 100 мкм, знижує твердість цементованої поверхні на 10 одиниць за шкалою Роквеллу. При цьому довговічність зубчастих коліс знижується в 8 разів. Технолог при розподілі припуску по проходах шліфування повинен знати, на яку глибину поширюватиметься припик і не повинен допускати, щоб глибина припіку перевищувала припуск під подальші проходи.

Розподілу припуску при багатопрохідному шліфуванні і визначенню

глибин фазовоструктурних перетворень присвячені роботи [1-5]. У даній статті вказані шляхи визначення глибин проникнення температур, при яких в оброблюваному матеріалі починають відбуватися фазові і структурні перетворення. Розрахунки цих глибин можна проводити при шліфуванні як суцільними, так і переривчастими кругами.

Виклад основного матеріалу. У роботі [1] надається математичне рішення задачі наростання температурного поля від безперервного нескінченно-довгого смугового джерела, що рухається по плоскій поверхні напівнескінченного тіла. Початкова температура приймалася рівною нулю. Теплообмін з навколишнім середовищем відсутній. Інтенсивність теплового потоку з часом не міняється.

У системі відліку, рухомій разом з тепловим джерелом, в безрозмірних величинах рішення в роботі [1] представлене у вигляді:

$$T^* = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi}} \int_0^{Fo} e^{-\frac{\chi^2}{4\tau}} \cdot \Phi(\xi, \tau) \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}}, \quad (1)$$

$$\text{де} \quad T^* = \frac{\lambda}{q \cdot h} \cdot T; \quad (2)$$

$$\Phi(\xi, \tau) = \operatorname{erf}\left(\frac{\xi + U \cdot \tau + 1}{2 \cdot \sqrt{\tau}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\xi + U \cdot \tau - 1}{2 \cdot \sqrt{\tau}}\right); \quad (3)$$

T – температура, °C; q – інтенсивність (щільність) теплового потоку, Вт/м²; h – напівширина теплового джерела, м; λ – коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу, Дж/(м²·сек·°C); $Fo = \frac{a}{h^2} \cdot t'$ – безрозмірний комплекс часу (число Фур'є); t' – час, сек; $\tau = \frac{a}{h} \cdot t''$ – безрозмірний комплекс, визначений часом дії теплового джерела; $\xi = \frac{Z}{h}$ – безрозмірна координата у напрямі осі Z (у напрямі руху теплового джерела); $U = \frac{V \cdot h}{a}$ – безрозмірний комплекс швидкості V переміщення

теплого джерела (число Пеклі); a – коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу, $\text{м}^2/\text{сек}$; $\chi = \frac{x}{h}$ – безрозмірна координата у напрямі осі x (у глиб деталі).

На рис. 1 представлений розподіл безрозмірних температур в напівнескінченному тілі по глибині. Температури розраховувалися для $0 \leq \chi \leq 1,52$ і для $U = 1,03$ (суцільні лінії) $U = 3,16$ (штрихові лінії).

Криві побудовані для безрозмірного часу насичення, розрахованого по формулі [7]

$$Fo_{0,n} = \frac{-[2 \cdot (\xi - 1) \cdot U - 12] + \sqrt{48 \cdot [3 - U \cdot (\xi - 1)]}}{2 \cdot U^2}.$$

Відрізок $[+1; -1]$ на осі ξ відповідає ширині теплового джерела.

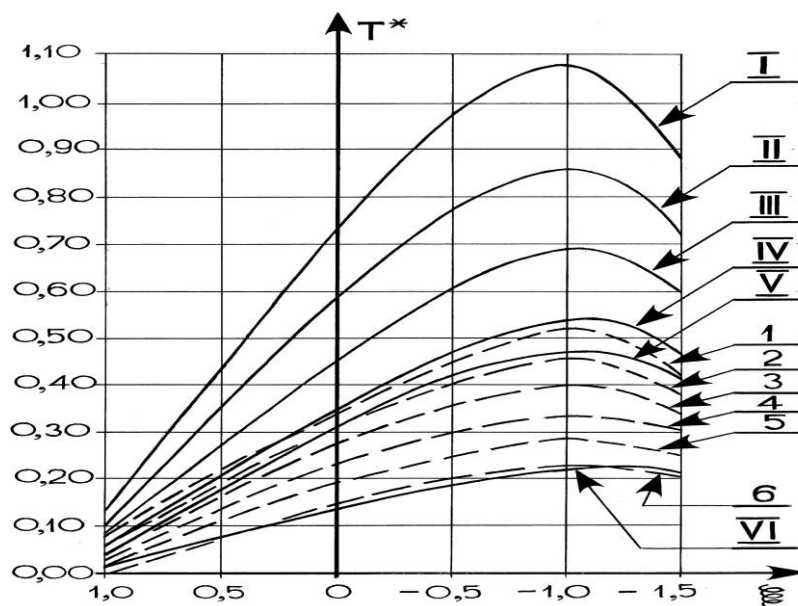


Рисунок 1 – Розподіл температур в напівнескінченному тілі по глибині для $U = 1,03$ (суцільні лінії) $U = 3,16$ (штрихові лінії). Криві I, II, III, IV, V, VI побудовані для $\chi = 0; 0,35; 0,65; 0,85; 1,12; 1,52$ відповідно.

Криві 1, 2, 3, 4, 5, 6 побудовані для $\chi = 0; 0,1; 0,2; 0,31; 0,37; 0,51$ відповідно

Рис. 1 говорить про вплив величини безрозмірного комплексу U на характер і глибину розподілу безрозмірних температур. З рисунка видно,

що зростання безрозмірного комплексу швидкості U супроводжується пониженням значень безрозмірних температур.

Рис. 2 і рис. 3 ілюструють побудову залежності коефіцієнта пониження температури $P_{\max}$ від безрозмірної координати, що відлічується по осі, направлений по нормалі до оброблюваної поверхні. Ця залежність побудована для числа Пеклі $U = 1,03$.

$$P_{\max} = \frac{T_{\chi}^*}{T_{\max}^*},$$

де T_{χ}^* – максимальна безрозмірна температура на заданій глибині χ ;

$T_{\max}^*$ – максимальна безрозмірна температура на поверхні.

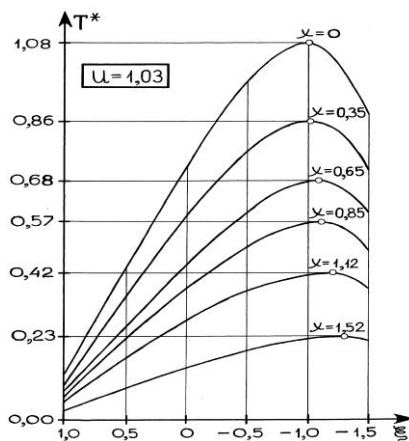


Рисунок 2 – Розподіл безрозмірних температур в напівнескінченному тілі по глибині для $U = 1,03$

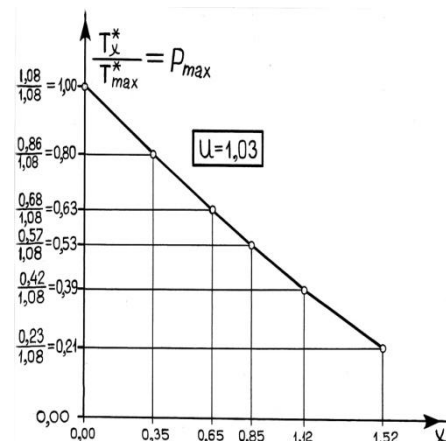


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта пониження безрозмірної температури від глибини для числа Пеклі $U = 1,03$

На рис.4. представлені залежності коефіцієнта пониження температури $P_{\max}$ від безрозмірної глибини, побудовані для різних значень безрозмірного комплексу швидкості U .

У загальному вигляді коефіцієнт пониження температури $P_{\max}$ можна представити у вигляді побутку безрозмірної глибини χ і множника C , залежного від безрозмірного комплексу швидкості U :

$$P_{\max} = \frac{T_{\chi}^*}{T_{\max}^*} = \frac{T_{\chi}^*}{T_{\max}^*} \cdot \frac{1}{\chi} \cdot \chi = C \cdot \chi. \quad (4)$$

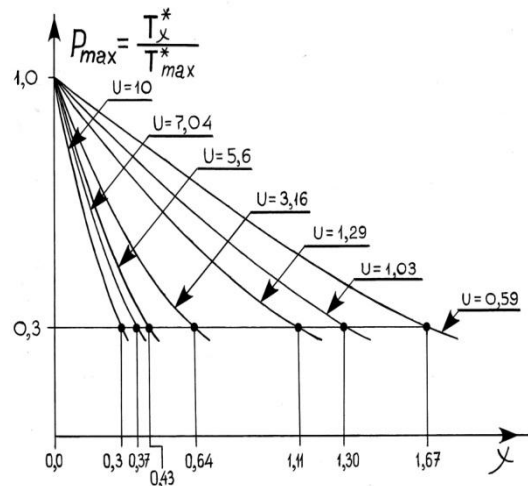


Рисунок 4 – Залежність коефіцієнта пониження температури від глибини для різних значень безрозмірної швидкості U

На основі рис. 4. Побудована залежність множника C від числа Пеклі U для $P_{\max} = 0,3$ (рис. 5) і для $P_{\max} = 0,666; 0,571; 0,500; 0,444; 0,400; 0,266$ (рис. 6).

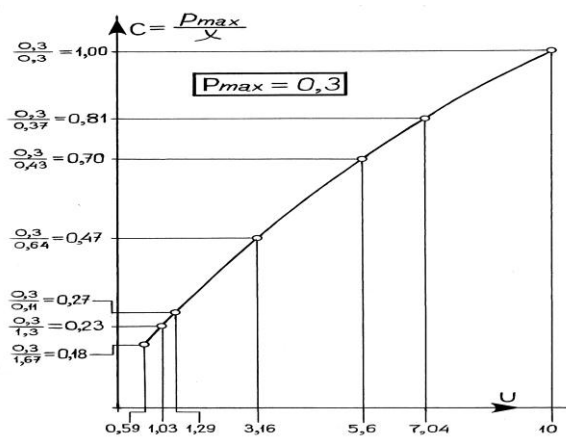


Рисунок 5 – Залежність множника C від числа Пеклі U для $P_{\max} = 0,3$

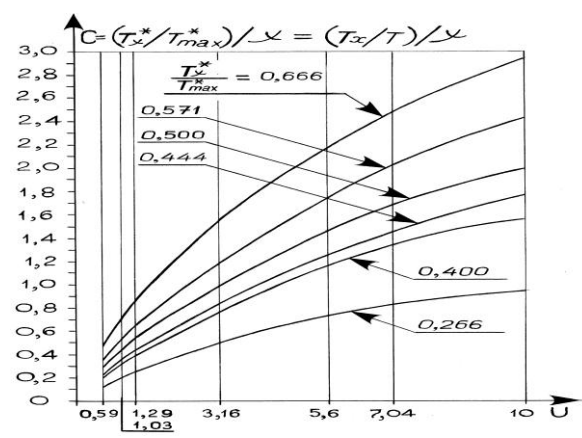


Рисунок 6 – Залежність множника C від числа Пеклі U для різних значень $P_{\max}$

Графіки, побудовані на рис. 6, можна апроксимувати виразом

$$C = (1,7416 \cdot \sqrt{U} - 0,61) \cdot 4 \sqrt[5]{\left(\frac{T_{\chi}^*}{T_{\max}^*} \right)^5} \quad (5)$$

Для розрахунків комплекс U задамо в інтервалі $0,588 \leq U \leq 10$. Цей діапазон визначається можливими на практиці швидкостями переміщення теплового джерела при зубошліфуванні по методу обгинання, шириною зони контакту інструменту з деталлю і теплофізичними параметрами цементованих сталей. Верхня межа, тобто час насичення $F_{0.n.}$ для інтеграла (1) знаходився по наближеній теоретичній формулі [7].

На рис. 7, а і рис. 7, б представлена залежність максимальної безрозмірної температури T^* від безрозмірного часу F_0 для різних значень числа Пеклі.

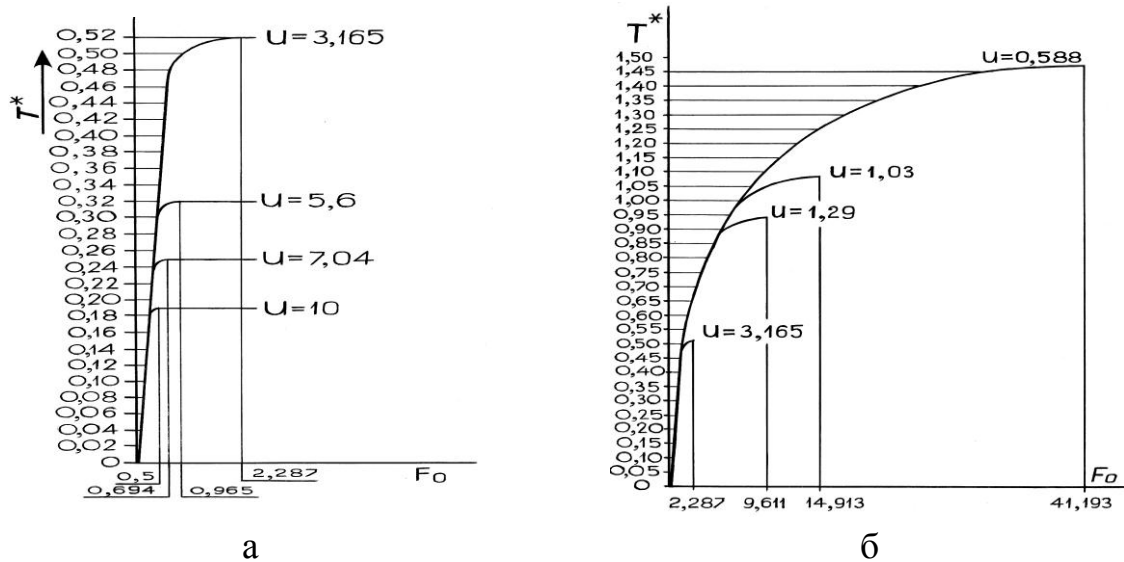


Рисунок 7 – Встановлення максимальної температури для $\xi = -1$; $\chi = 0$; (а) $U = 3,165$; 5,6; 7,04; 10; (б) $U = 0,588$; 1,03; 1,29; 3,165

З графіків видно, що в початковий момент часу зростання температури йде однаковим чином незалежно від безрозмірного комплексу швидкості U . Всі графіки, зображені на рис.7,а і рис.7,б, побудовані для поверхневих температур (тобто для безрозмірної координати $\chi = 0$). Для $\chi = 0$ інтеграл (1) має вигляд:

$$T^* = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi}} \int_0^{F_0} \Phi(\xi, \tau) \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}}. \quad (6)$$

З графіків (рис. 7, а і рис. 7, б) і додаткових розрахунків встановлена графічна залежність $T_{\max}^* = f(U)$ (рис. 8).

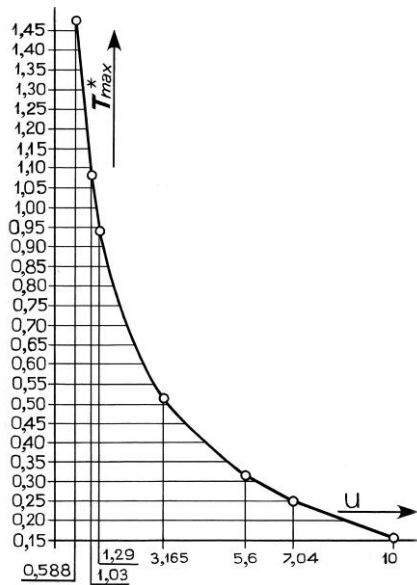


Рисунок 8 – Залежність максимальної температури на поверхні тіла від числа Пеклі U

Графічна залежність добре апроксимується виразом:

$$T_{\max}^* = \frac{1,6}{\sqrt{U}} - \frac{(0,16 - 0,325 \cdot U)}{U}. \quad (7)$$

З виразу(4) визначимо безрозмірну глибину χ

$$\chi = \frac{T_{\chi}^*}{T_{\max}^*} \cdot \frac{1}{C}. \quad (8)$$

Після підстановки (5) у вираз деяких перетворень отримаємо

$$\chi = \left(\frac{T_{\max}^*}{T_{\chi}^*} \right)^{0,25} \cdot \frac{1}{(1,7416 \cdot \sqrt{U} - 0,61)}. \quad (9)$$

По графіках, представлених на рис. 9, а можна простежити вплив глибини різання t й числа ріжучих виступів n на кругу, на температуру переривчастого шліфування θ .

Розрахунки виконувалися для наступних умов: зубчасті колеса ($m=8$ мм) із цементованої сталі 12Х2Н4А (HRC=60; $a=4 \cdot 10^{-6}$ м/сік; $\lambda=16,7$ Дж/(м·град·сік); $c \cdot \rho_m = 4 \cdot 10^6$ Дж/(м²·сік)) оброблялися на зубошліфувальному верстаті МААГ з нульовим настроюванням кругів 24А25СМ26К ($D_{kp}=225$ мм; $r=2,4$ мм; $\gamma=45^\circ$; $k'=5 \cdot 10^6$ зерен/м²) на

режимах $V_{кр} = 30 \text{ м/с}$; $S = 3,57 \cdot 10^{-6} \text{ м/кач} = 400 \text{ мм/хв}$; $V_{обк} = 1,95 \text{ м/хв}$;
 $t = 0,025 \text{ мм}; 0,030 \text{ мм}; 0,035 \text{ мм}; 0,040 \text{ мм}; 0,045 \text{ мм}; 0,050 \text{ мм}; 0,055 \text{ мм}$.

З рис. 9, а видно, що температура шліфування θ зростає із збільшенням глибини різання t й зменшенням кількості прорізів на кругу.

На рис. 9, б показано, як змінюється відношення $\frac{\theta_{cn}}{\theta_{np}}$, що

характеризує ступінь зниження температури переривчастого шліфування в порівнянні із суцільним, при зміні глибини різання t й кількості n прорізів на шліфувальному кругу.

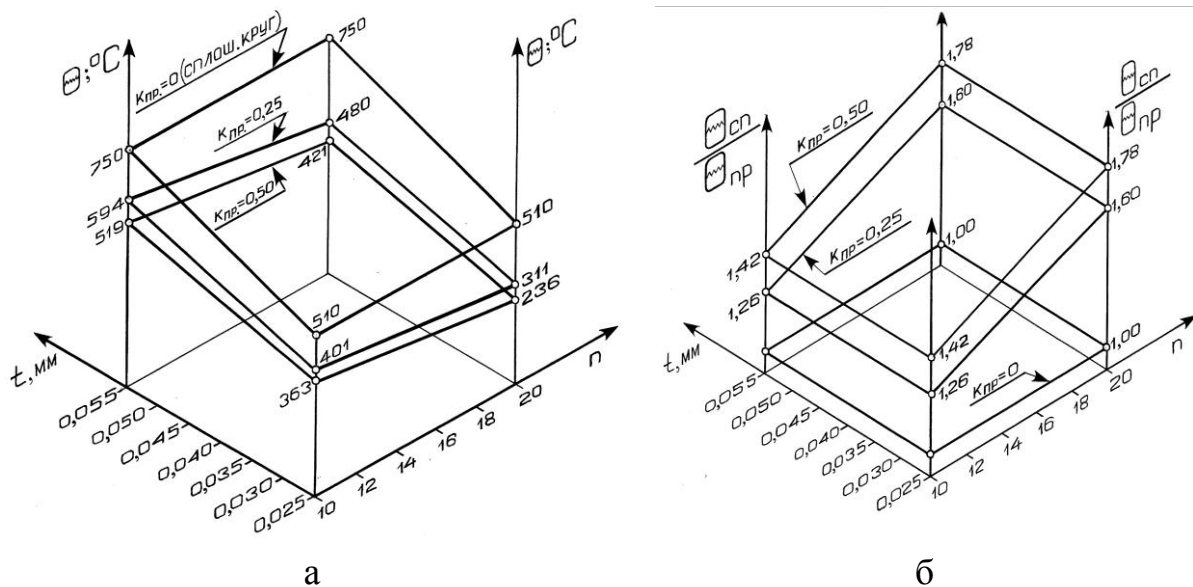


Рисунок 9 – Залежності температури переривчастого шліфування θ (а) і величини відношення температури суцільного шліфування θ_{cn} до температури переривчастого шліфування θ_{np} (б) від глибини різання t й від числа ріжучих виступів n на кругу,

які розраховані для різних значень коефіцієнта переривчастості $K_{np} = \frac{L'_2}{L'_1}$

З рис. 9, б видно, що зі збільшенням кількості западин на кругу ступінь зниження температури переривчастого шліфування в порівнянні із суцільним зростає. Зі зміною глибини різання t відношення $\frac{\theta_{cn}}{\theta_{np}}$ не міняється.

На рис. 10 показані залежності відносини температур $\frac{\theta_{cn}}{\theta_{np}}$, що виникають при шліфуванні кругами із суцільної й переривчастої робочими поверхнями, від числа n й від співвідношення довжин западин L'_2 і ріжучих виступів L'_1 . Ці залежності можна описати рівнянням площини, що проходить через три точки, що не належать одній прямій.

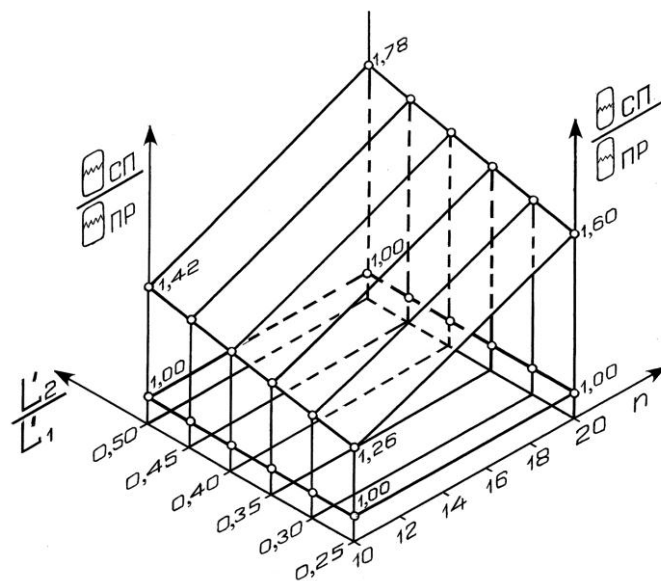


Рисунок 10 – Залежності відносини $\frac{\theta_{cn}}{\theta_{np}}$ температур,

що виникають при шліфуванні суцільним і переривчастим кругами, від коефіцієнта переривчастості $K_{np} = \frac{L'_2}{L'_1}$ й від числа ріжучих виступів n на кругу

Рівняння площини, що проходить через три точки

$$M_1 \left[n_1, \left(\frac{L'_2}{L'_1} \right)_1, \left(\frac{\theta_{cn}}{\theta_{np}} \right)_1 \right], M_2 \left[n_2, \left(\frac{L'_2}{L'_1} \right)_2, \left(\frac{\theta_{cn}}{\theta_{np}} \right)_2 \right], M_3 \left[n_3, \left(\frac{L'_2}{L'_1} \right)_3, \left(\frac{\theta_{cn}}{\theta_{np}} \right)_3 \right],$$

задані щодо загальної декартової системи координат і не приналежній одній прямій, як площина, що проходить через крапку

$$M_3 \left[n_3, \left(\frac{L'_2}{L'_1} \right)_3, \left(\frac{\theta_{cn}}{\theta_{np}} \right)_3 \right], \text{ неколінеарним векторам :}$$

$$\overrightarrow{M_3 M_1} = \left\{ n_1 - n_3, \left(\frac{L'_2}{L'_1} \right)_1 - \left(\frac{L'_2}{L'_1} \right)_3, \left(\frac{\theta_{cn}}{\theta_{np}} \right)_1 - \left(\frac{\theta_{cn}}{\theta_{np}} \right)_3 \right\}$$

$$\text{і } \overrightarrow{M_3 M_2} = \left\{ n_2 - n_3, \left(\frac{L'_2}{L'_1} \right)_2 - \left(\frac{L'_2}{L'_1} \right)_3, \left(\frac{\theta_{cn}}{\theta_{np}} \right)_2 - \left(\frac{\theta_{cn}}{\theta_{np}} \right)_3 \right\},$$

де $M_1(10; 0,25; 1,26)$, $M_2(10; 0,50; 1,42)$, $M_3(20; 0,50; 1,78)$
має вигляд

$$\begin{vmatrix} n - n_3 & \frac{L'_2}{L'_1} - \left(\frac{L'_2}{L'_1} \right)_3 & \frac{\theta_{cn}}{\theta_{np}} - \left(\frac{\theta_{cn}}{\theta_{np}} \right)_3 \\ n_1 - n_3 & \left(\frac{L'_2}{L'_1} \right)_1 - \left(\frac{L'_2}{L'_1} \right)_3 & \left(\frac{\theta_{cn}}{\theta_{np}} \right)_1 - \left(\frac{\theta_{cn}}{\theta_{np}} \right)_3 \\ n_2 - n_3 & \left(\frac{L'_2}{L'_1} \right)_2 - \left(\frac{L'_2}{L'_1} \right)_3 & \left(\frac{\theta_{cn}}{\theta_{np}} \right)_2 - \left(\frac{\theta_{cn}}{\theta_{np}} \right)_3 \end{vmatrix} = 0 \quad (10)$$

$$\begin{vmatrix} n - 20 & \frac{L'_2}{L'_1} - 0,5 & \frac{\theta_{cn}}{\theta_{np}} - 1,78 \\ 10 - 20 & 0,25 - 0,50 & 1,26 - 1,78 \\ 10 - 20 & 0,50 - 0,50 & 1,42 - 1,78 \end{vmatrix} = 0 \quad (11)$$

Обчислюючи визначник 3-його порядку (11) по «правилу Саррюса»,
одержимо:

$$\frac{\theta_{cn}}{\theta_{np}} = 0,036 \cdot n + 0,64 \cdot \frac{L'_2}{L'_1} + 0,74. \quad (12)$$

Знаючи геометричні параметри переривчастого круга (довжини його виступів і западин) і кількість прорізів на його робочій поверхні, по формулі (12) можна розрахувати в скільки разів температура при переривчастому шліфуванні буде менше, ніж при суцільному. Маючи цю інформацію, можна безрозмірну глибину дефектного (відпущеного) шару χ при переривчастому шліфуванні розраховувати по формулі:

$$\chi = \left(\frac{\frac{1.6}{\sqrt{U}} - \frac{(0.16 - 0.325 \cdot U)}{U}}{T_{\chi}^* \cdot \left(0.036 \cdot n + 0.64 \cdot \frac{L_2'}{L_1'} + 0.74 \right)} \right)^{0.25} \cdot \frac{1}{(1.7416 \cdot \sqrt{U} - 0.61)}, \quad (13)$$

$$\text{де } U = \frac{V_{\text{обк}} \cdot L_1 / 2}{a}; \quad \chi = \chi \cdot \frac{L_1}{2};$$

$V_{\text{обк}}$ – швидкість обкатування; χ – глибина дефектного (відпущеного) шару; L_1 – ширина зони контакту шліфувального круга із зубом оброблюваної шестірні; T_{χ}^* – безрозмірна температура, при якій в металі починають відбуватися фазові і структурні перетворення.

Формула (13) справедлива тільки для $10 \leq n \leq 20$; $0 < 25 \leq \frac{L_2'}{L_1'} \leq 50$.

Висновки. Отримана аналітична залежність, що дозволяє проводити розрахунки глибини проникнення припиків, що утворюються при зубошліфуванні суцільним і переривчастим абразивними тарілчастими кругами. Запропанована формула може бути покладена в основу проектування переходів зубошліфування на верстатах, що працюють тарілчастими абразивними кругами по методу обгинання.

Список використаних джерел : 1. Якимов, А.В. К расчету температурного поля при шлифовании /А.В. Якимов, Ю.А. Напарин, Н.А. Ярмонов // Изв. ВУЗов. – М.: Машиностроение, 1973. – №99. – С.171-175. 2. Ларишин, В.П. Расчет температуры и глубины дефектного слоя при резьбошлифовании /В.П. Ларишин, Н.В. Лищенко //Труды Одесского политехнического университета. – 2005. – Вып.2. – С.64-68. 3. Ларишин, В.П. Оптимизация режимов зубошлифования на станках типа «МАОГ» /В.П. Ларишин

//Механическая обработка деталей машин и приборов: Тез. докл. респуб. научн. конф. – Киев: РДЭНТП, 1976. – С.15-16. 4. Ларшин, В.П. Оптимизация распределения припуска на проходы при зубошлифовании на станках типа «МАОГ» /В.П. Ларшин, А.А. Якимов //Физические и компьютерные технологии: Труды 5-й междунар. научн.-техн. конф. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2002. – С.19-23. 5. Лебедев, В.Г. Технологические основы управления качеством поверхностного слоя при шлифовании: Автореф. Дис. ... докт. техн. наук. – Киев. 1991. 6. Повышение надежности тяжело нагруженных зубчатых передач /М.Д. Генкин, М.А. Рыжов, Н.М. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 232с. 7. Якимов, О.О. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару зубів високоточних зубчастих коліс при шліфуванні: дис. ... д-р. техн. наук /О.О. Якимов. – Одеса, 2014.

Bibliography (transliterated): 1. Jakimov, A.V. K raschetu temperaturnogo polja pri shlifovanii /A.V. Jakimov, Ju.A. Naparin, N.A. Jarmonov // Izv. vuzov. – M.: Mashinostroenie, 1973. – №99. – S.171-175. 2. Larshin, V.P. Raschet temperatury i glubiny defektnogo sloja pri rez'boshlifovanii /V.P. Larshin, N.V. Lishhenko //Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta. – 2005. – Vyp.2. – S.64-68. 3. Larshin, V.P. Optimizacija rezhimov zuboshlifovanija na stankah tipa «MAAG» /V.P. Larshin //Mehanicheskaja obrabotka detalej mashin i priborov: Tez. dokl. respub. nauchn. konf. – Kiev: RDJeNTP, 1976. – S.15-16. 4. Larshin, V.P. Optimizacija raspredelenija pripuska na prohody pri zuboshlifovanii na stankah tipa «MAAG» /V.P. Larshin, A.A. Jakimov //Fizicheskie i komp'juternye tehnologii: Trudy 5-j mezhdunar. nauchn.-tehn. konf. – Har'kov: HNPK «FED», 2002. – S.19-23. 5. Lebedev, V.G. Tehnologicheskie osnovy upravlenija kachestvom poverhnostnogo sloja pri shlifovanii: Avtoref. Dis. ... dokt. tehn. nauk. – Kiev. 1991. 6. Povyshenie nadezhnosti tjazhelonagruzhennyh zubchatyh peredach /M.D. Genkin, M.A. Ryzhov, N.M. Ryzhov. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 232s. 7. Jakimov, O.O. Tehnologichne zabezpechennja jakosti poverhnevogo sharu zubiv visokotochnih zubchastih kolis pri shlifuvanni: dis. ... d-r. tehn. nauk /O.O. Jakimov. – Odesa, 2014.

ЕКОНОМІКА ТА ЕКОЛОГІЯ

УДК 621.002.02

В.С. ГУСАРЕВ, канд. техн. наук,
А.Б. КАДХИМ, Одесса, Україна

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗАТРАТЫ НА ПРОИЗВОДСТВО ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Енергетичні витрати на виробництво виробів машинобудування. Розглянуто технологічні операції, зазначені енергетичні показники, які являють собою характеристику питомої роботи, як відношення витраченої енергії до одиниці об'єму, деформованого матеріалу в певній операції.

Энергетические затраты на производство изделий машиностроения. Рассмотрены технологические операции, указаны энергетические показатели, которые представляют собой характеристику удельной работы, как отношение затраченной энергии к единице объема, деформируемого материала в определенной операции.

Energy costs for the production of engineering products. Technological operations, specified energy performance, which represent characteristics of specific works, as the ratio of energy expended per unit of volume, of a deformable material in a particular operation.

Технология машиностроения содержит большой спектр физических процессов, начиная от обработки металлов давлением (ОМД), резанием (ОМР), до физических и химических процессов (ФХОМ) воздействия на вещество (материал). Основным показателем этих процессов, несмотря на их физическое разнообразие, является время (t) или обратная величина – производительность (t^{-1}). Как физическая категория время – длительность (период) протекания процесса, а производительность – частота, с которой производится продукт технологического процесса, иначе скорость выпуска технологической продукции.

Время, как основной технологический показатель, является

© В.С. Гусарев, А.Б. Кадхим, 2015

необходимым для анализа и синтеза процессов, но не достаточным его показателем. Любой физический (химический) процесс, положенный в основу технологического процесса (операции) для выполнения технологического воздействия, требует затраты работы и её меры энергии.

Работа и ее эквивалент – энергия является необходимым и достаточным показателем технологического процесса (операции) вне зависимости от физического содержания.

Удельная работа (энергия) процесса - это энергия (Дж), необходимая для выполнения работы над единичным объемом материала (см^3). Удельная энергия процесса характеризует технологический процесс по расходу энергоресурса. Основные операции технологических процессов существенно различаются по удельной энергии (Дж/ см^3). Эту особенность различных процессов обработки обнаружили многие исследователи различных процессов. Этот, как правило сопутствующий результат исследований не привлекал внимания, т.к. лежал вне области решаемой задачи.

Удельная работа (энергия) физического процесса (операции) определена интервалом значений, который зависит от обобщенных физико-механических характеристик обрабатываемых материалов в данном конкретном процессе. Нижняя граница интервала соответствует менее высоким, а верхняя – более высоким характеристикам материала

Впервые подобные статистические показатели удельной работы, как характеристики технологической операции были приведены в статье д.т.н. В.В. Швеца еще в 1967 году [1]. В этой статье предлагалось рассматривать идеальные технологические процессы, исходя из атомно-молекулярного подхода к скорости процессов разрушения вещества. Автор сосредоточил внимание на двух скоростных зонах предельного состояния деформированного вещества.

Первая зона – с предельной скоростью деформации, равной скорости звука, вторая – с предельной скоростью деформации равной скорости света. Далее, автор предложил двухкоординатную таблицу «удельная энергия – скорость процесса», которая, к сожалению, не стала «таблицей Менделеева».

Таблица 1

Наименование операции	Удельная работа a , (Дж/см ³)
1.Холодная листовая гибка	5...10
2.Холодная гибка проф.(труб) на роликах	20...40
3.Штамповка на гидравлических прессах	20...60
4.Штамповка взрывом	20...76
5.Горячая штамповка без нагрева	60...80
6.Волочение проволоки	66...70
7.Волочение труб без оправки	$(2,1...2,7) \cdot 10^2$
8.Волочение труб с оправкой	$(5 \dots 6,0) \cdot 10^2$
9.Холодная резка на ножницах	$(4 \dots 5,1) \cdot 10^2$
10.Обдирка однопроходная	$(4 \dots 5,5) \cdot 10^2$
11.Выдавливание холодное	$(5,5...8,5) \cdot 10^2$
12.Высадка холодная	$(5,6 \dots 14) \cdot 10^2$
13.Резание баллистическое	$(1,0...1,3) \cdot 10^3$
14.Точение	$(1,7...2,5) \cdot 10^3$
15.Протягивание	$(2,5...4,0) \cdot 10^3$
16.Зенкерование	$(3,0...4,8) \cdot 10^3$
17.Сверление	$(1,0...6,2) \cdot 10^3$
18.Фрезерование	$(5,0...7,5) \cdot 10^3$
19.Развертывание	$(1,2...3,0) \cdot 10^4$
20.Шлифование	$(5,1...7,5) \cdot 10^4$
21.Электроконтактная обработка	$(0,3...1,2) \cdot 10^5$
22.Электрохимическое шлифование	$(1,4...5,8) \cdot 10^5$
23.Электрохимическое полирование	$(2,2...4,3) \cdot 10^5$
24.Электронно-лучевая обработка	$(2,4...5,8) \cdot 10^5$
25.Электроимпульсная обработка	$(3,5...7,0) \cdot 10^5$
26.Ультразвуковая	5...10
27.Электроискровая	20...40

В заключение автор сформулировал основные требования к идеальным процессам обработки:

1. В основу процесса должны быть положены электрические или световые явления, так как только они обладают способностью создавать сверхзвуковые скорости.

2. Энергия, необходимая для процесса обработки, должна вводиться непосредственно в рабочую зону, минуя всевозможные передаточные звенья и преобразования.

3. Энергия должна направляться на нарушение и ослабление минимально необходимого количества связей, затрагивая ближайших слоев обрабатываемого материала».

Наш интерес к удельной работе технологической операции позволяет рассмотреть вопрос с нескольких направлений

1. Расставить технологические процессы по возрастанию показателя удельной работы, что позволяет просмотреть тенденцию развития процессов.

2. Классифицировать процессы механической обработки именно по удельным энергетическим показателям.

3. Исследовать наиболее перспективные направления в технологии обработки материалов

4. Сопоставить альтернативные процессы, обеспечивающие одинаковый результат качества, но различающихся по удельным характеристикам.

5. Проектировать такие варианты процессов обработки, которые будут иметь минимальную энергоемкость.

6. Стимулировать инновационную модернизацию технологических производств с целью более экономного расходования энергии на решение технологических задач.

Основная тенденция развития процессов механической обработки материалов представлена графиком, который характеризует три класса операций, четко фиксированных в общем массиве процессов. В первую очередь это процессы обработки давлением (ОМД), которые имеют интервал удельной работы $[Дж/см^3]$: $a = (5 \cdot 10^2 \cdot \dots \cdot 5,5 \cdot 10^2)$; во вторую – процессы обработки металлов резанием (ОМР) с интервалом удельной работы $a = (2 \cdot 10^3 \cdot \dots \cdot 1,5 \cdot 10^4)$; третью – процессы обработки материала

физическими и химическими методами (ФХОМ) с интервалом удельной работы $a = (3 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^7)$.

Предлагаемая классификация, с одной стороны широко известна, т.к. в качестве одного её признака выдвигается различное инструментальное взаимодействие, как у проф. Г.И. Грановского – кинематическая классификация, или как у академика Л.Н. Кошкина – геометрическая классификация процессов; с другой стороны здесь предлагается классификация процессов по признаку (интервалу) удельной работы.

Основные классы ОМД, ОМР, ФХОМ технологических процессов существенно различаются по удельной энергии [$\text{Дж}/\text{см}^3$]. Как видно из приведенных данных таблицы и графика наиболее экономичные процессы ОМД – холодная гибка листов (производство кузовов автомобилей), штамповка взрывом (бесшовное производство емкостей техники). Достаточно экономичные процессы ОМР в традиционных операциях точения (обработка тел вращения) и протягивания (обработка плоскостей корпусов). Совершенно неэкономичные процессы ФХОМ – ультразвуковая и лазерная обработка. Эти процессы специального назначения, необходимые для обработки сверхтвердых материалов[2, 5, 6, 7, 8, 9].

Удельный показатель работы (энергии) в технологическом процессе можно использовать при определении общей работы (энергии) на выполнение технологической операции.

Так, например, холодная гибка на роликах труб из алюминия $a_{ал} = 20$, а из стали $a_{ст} = 40$, что приводит к двукратной экономии энергии на производство изделий, при одинаковом их функциональном применении. Здесь не учитываются затраты (стоимость) на различные материалы, а иллюстрируются энергетические особенности одного и того же процесса в определении интервала удельных энергетических затрат. Это лишь один из многих примеров того, что на производство алюминия в последнее время обращено чрезвычайное внимание.

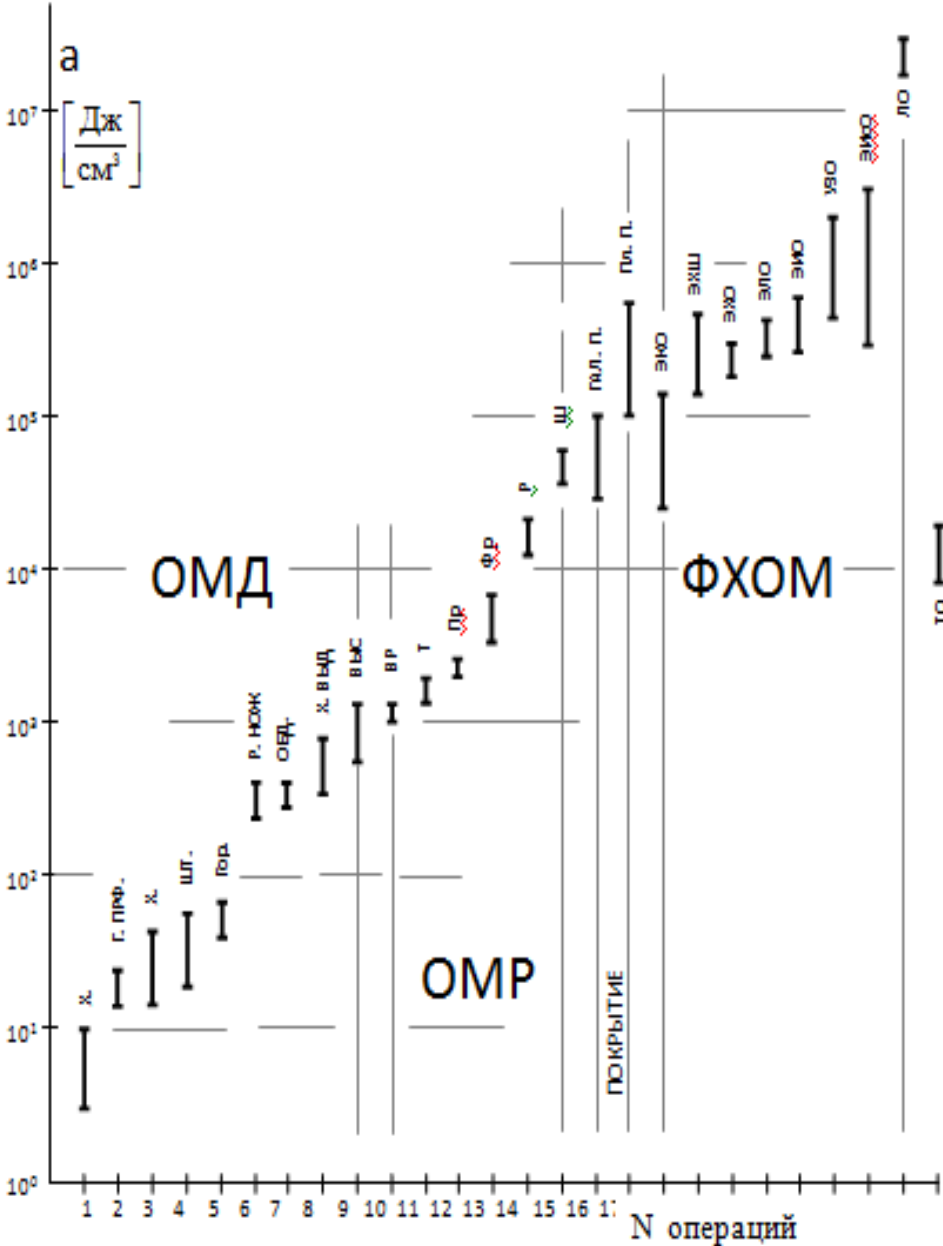


Рисунок – Удельная работа (энергия) технологической операции

Работа технологической операции /процесса/. Эта работа затрачивается на преобразование заготовки в изделие в объемах, определенных геометрическими величинами:

$$A=a \cdot V \quad (1)$$

для процессов ОМД, т.к. соблюдается принцип постоянства объема заготовки и изделия, т.е. $V_3 = V_0 = V$;

$$A = a \cdot \Delta V \quad (2)$$

для процессов ОМР и ФХОМ, т.к. воздействию подвергается не весь объем, а его часть $\Delta V = V_z - V_o$.

Используя условие одинакового объема преобразования для различных по технологическому (и физическому) содержанию процессов, можно произвести их сравнение по энергетическим затратам.

Сравним финишную обработку изделия, выполненного из одного и того же материала, имеющего определенный припуск на обработку двумя альтернативными методами (процессами) - круглым шлифованием и тонким точением:

$$A_{ш} = a_{ш} \cdot \Delta V_{ш}, \quad A_m = a_m \cdot \Delta V_m \quad (3)$$

Из условия равных объемов $\Delta V_{ш} = \Delta V_m$ после элементарных преобразований получим: $\frac{A_{ш}}{a_{ш}} = \frac{A_m}{a_m}$ или $\frac{A_{ш}}{A_m} = \frac{a_{ш}}{a_m}$,

но $a_{ш} = (5,5 \dots 7,5) \cdot 10^4$, $a_m = (1,7 \dots 2,5) \cdot 10^3$, т.е.

$$\frac{A_{ш}}{A_m} = \frac{(5,5 \dots 7,5) \cdot 10^4}{(1,7 \dots 2,5) \cdot 10^3} = 30$$

Таким образом, процесс тонкого точения в 30 раз менее энергоемок, чем процесс шлифования при снятии одинакового припуска. Возможно, столь большая величина энергозатрат при шлифовании вызовет удивление? Однако напомним, что «удельная» энергия зависит от соотношения процесса трения, царапания и резания, являющихся составными элементами шлифования. Сравнение этих двух процессов в технологической практике (литературе) не анализировалось и обсуждению не подвергалось. Рассмотрим другой пример. Обработка шлицевых валов обычно выполняется в две операции ОМР, первая – фрезерование, вторая – шлифование. Если производить накатку роликами, т.е. перейти к операции ОМД, то сравнивая затраты энергии получим:

$$a_{\phi} = (5,0 \dots 7,5) \cdot 10^3; \quad a_{\text{ш}} = (5,1 \dots 7,5) \cdot 10^4, \quad a_{\text{омд}} = (5,5 \dots 8,5) \cdot 10^2$$

$$\frac{A_{\text{ш}+\phi}}{A_{\text{омд}}} = \frac{(5,0 \dots 7,5) \cdot 10^3 + (5,1 \dots 7,5) \cdot 10^4}{(5,5 \dots 8,5) \cdot 10^2} = 110,90$$

Таким образом, получаем более чем стократное различие затрат энергии. Естественно, эти расчеты приблизительные, но все же указывают на направление работы исследователей.

Сравнение и выбор технологических решений на основе энергетического критерия. При производстве изделий с участием рабочего энергия на выполнение технологической операции складывается из суммы затрат энергии: рабочего ($\mathcal{E}_p$), собственно процесса обработки ($\mathcal{E}_n$) и частично переносимой «аккумулированной», или вложенной в прошлом энергии на производство оборудования ($\mathcal{E}_m$), т.е.

$$\mathcal{E}_{\text{оп}} = \mathcal{E}_p + \mathcal{E}_n + \mathcal{E}_m, \quad (4)$$

где $\mathcal{E}_p = t_p \cdot P_p$, $\mathcal{E}_n = t_n \cdot P_n$, $\mathcal{E}_m = t_m \cdot (P_m + m \cdot \frac{e}{T})$, t_p – время работы рабочего, P_p – «мощность» рабочего, t_n – машинное время, P_n – мощность станка, расходуемая на процесс обработки, m – масса (усредненная) оборудования, T – ресурс эксплуатации оборудования, e – энергосодержание (аккумулированная энергия) оборудования.

Если сравниваемые технологические операции различаются только применяемым оборудованием, т.е. $\mathcal{E}_p^{(1)} = \mathcal{E}_p^{(2)}$; $\mathcal{E}_n^{(1)} = \mathcal{E}_n^{(2)}$, то достаточно сравнивать по $\mathcal{E}_m^{(1)}$ – первого и $\mathcal{E}_m^{(2)}$ – второго варианта.

Энергоэкономический эффект (ЭЭФ) от применения прогрессивного оборудования по сравнению с исходным [2]:

$$\Delta \mathcal{E}_m = \mathcal{E}_m^{(1)} - \mathcal{E}_m^{(2)} \quad \text{или}$$

$$\Delta \mathcal{E}_m = t_m^{(1)} (P_m^{(1)} + m^{(1)} \cdot \frac{e^{(1)}}{T^{(1)}}) - t_m^{(2)} (P_m^{(2)} + m^{(2)} \cdot \frac{e^{(2)}}{T^{(2)}}).$$

Пример. Обработка крышки (ГОСТ 11641-73) по одинаковому процессу, но выполняемому на револьверном станке IB340Ф2 и на шестишпиндельном полуавтомате IA282Б. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

	IB340Ф2	IA282Б
$t_m (с)$	100	20
$P_m (Вт)$	6×10^3	20×10^3
$m (кг)$	$2,5 \times 10^3$	13×10^3
$T (с)$	$7,2 \times 10^7$	$7,2 \times 10^7$
$e \left(\frac{Вт}{кг} \right)$	2×10^7	$3,5 \times 10^7$
$\mathcal{E}_m (Дж)$	7×10^5	$5,3 \times 10^5$

С учетом данных по затратам энергии на выполнение операций и на производство вещества материала (табл. 3, 4) экономия энергии на одно изделие при применении второго варианта будет: $\Delta \mathcal{E}_m = 7 \cdot 10^5 - 5,3 \cdot 10^5 = 1,7 \cdot 10^5$ Дж, при выпуске 1000 шт. составит ~ 50 кВт ч. Для получения результата сравнения в привычном денежном выражении можно воспользоваться «нефтяным» энергоэквивалентом: 1 кг (нефти) ~ 1 кВтч (энергии) ~ 5 \$ ~ 40 грн., тогда в приведенном примере ЭЭФ составит 10000 грн.

Таблица 3 – Затраты энергии на выполнение операции рабочим [10]

№	Вид работы	Энергозатраты, кДж/мин
1.	Механическая работа станочника	10,5.....19,3
2.	Механическая работа электрика	21,4.....23,1
3.	Работа слесаря	21,4.....30,1

Таблица 4 – Затраты энергии на производство вещества (материала) [4]

№	Вещество (материал)	Энергозатраты, <i>МДж/мин</i>
1.	Чугун	18.0
2.	Сталь	57.0
3.	Сталь прокат	80.0
4.	Цинк	90.0
5.	Медь	102.0
6.	Медь (матовая)	160.0
7.	Никель	700.0
8.	Титан	1100.0

Аналогичным образом возможно сравнивать сложные многооперационные процессы – варианты. Если изменяется физическое содержание операции, например, заменяется шлифование точением, то следует производить сравнение как по $\mathcal{E}_m$, так и по $\mathcal{E}_n$.

Список использованной литературы: 1. Швеи В.В. Распределение технологических процессов по энергетическим уровням и скоростным зонам // Вестник машиностроения, 1967, № 10. – с.61-62. 2. Армареги И.Дж., Браун Р.Х. Обработка металлов резанием. – М.: Машиностроение, 1977. – 327 с. 3. Гусарев В.С. Энергетическая эффективность технологических процессов // сб. Авиационно-космическая техника и технология, вып. 14 – Харьков.: ТАКУ им. Н.Е. Жуковского, 2000. – 420 с. 4. Янговский Е.И. Потoki энергии и эксергии. – М.: Наука, 1988. – 144 с. 5. Коваленко В.С. Лазерная технология. – К.: ВШ, 1989. – 280 с. 6. Оптимизация расхода энергии в процессах деформации. / Хензель А., Шпиттель Т. / / Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1985. – 184 с. 7. Обработка металлов давлением / Павлов И.М., Федосов Н.М., Северденко В.П. – М.: Металлургия, 1955. – 483 с. 8. Попилов Л.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка металлов. – М.: Машиностроение, 1982. – 400 с. 9. Рыжов А.В., Аверченков В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с. 10. Амосов Н.М. Бендет Я.А. Физическая активность и сердце. К.; Здоровье, 1975. – 255с. 11. Гусарев В.С. Энергетические проблемы современной технологии машиностроения // Вестник инженерной академии, Киев, №3, 2007, с. 165-176.

Bibliography (transliterated): 1. Shvec V.V. Raspredelenie tehnologicheskikh processov po jenergeticheskim urovnjam i skorostnym zonam / Vestnik mashinostroenija, 1967, № 10. – s.61-62. 2. Armarego I.Dzh., Braun R.H. Obrabotka metallov rezaniem. - M.: Mashinostroenie, 1977. – 327 s. 3. Gusarev V.S. Jenergeticheskaja jeffektivnost' tehnologicheskikh processov // sb. Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija, vyp. 14 – Har'kov.: TAKU im. N.E. Zhukovskogo, 2000. – 420 s. 4. Jantovskij E.I. Potoki jenergii i jeksergii. – M.: Nauka, 1988. – 144 s. 5. Kovalenko V.S. Lazernaja tehnologija. – K.: VSh, 1989. – 280 s. 6. Optimizacija rashoda jenergii v processah deformacii. / Henzel' A., Shpittel' T. / Per. s nem. – M.: Metallurgija, 1985. – 184 s. 7. Obrabotka metallov davleniem / Pavlov I.M., Fedosov N.M., Severdenko V.P. – M.: Metallurgija, 1955. – 483 s. 8. Popilov L.Ja. Jelektrofizicheskaja i jelektrohimicheskaja obrabotka metallov. – M.: Mashinostroenie, 1982. – 400 s. 9. Ryzhov A.V., Averchenkov V.I. Optimizacija tehnologicheskikh processov mehanicheskij obrabotki – K.: Naukova dumka, 1989. – 192 s. 10. Amosov N.M. Bendet Ja.A. Fizicheskaja aktivnost' i serdce. K.; Zdorov'e, 1975. -255s. 11. Gusarev V.S. Jenergeticheskie problemy sovremennoj tehnologii mashinostroenija// Vestnik inzhenernyj akademii, Kiev, N3, 2007, s. 165 – 176.

УДК 006.91

К.Д. ПОПЕРЕКА,

В.Л. КОСТЕНКО, д-р техн. наук, Одеса, Україна

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАННОГО КОНТРОЛЮ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗНИКА САНІТАРНО-ГІГІЄНІЧНИХ ФАКТОРІВ

У роботі проведено дослідження з розробки спеціалізованого програмного забезпечення автоматизованого контролю комплексного показника санітарно-гігієнічного стану робочої зони, описано алгоритм та структурну схеми програми, яка дозволяє в автоматичному режимі досліджувати нормовані параметри, прискорити процес вимірювання, а також обробити виміряні дані й оцінити їх невизначеність.

В работе проведено исследование по разработке специализированного программного обеспечения автоматизированного контроля комплексного показателя санитарно-гигиенического состояния рабочей зоны, описан алгоритм и структурную схемы программы, которая позволяет в автоматическом режиме исследовать нормированные параметры, ускорить процесс измерения, а также обработать измеренные данные и оценить их неопределенность.

In the study on the development of specialized software of the automated control complex refractive of sanitary and hygienic state of the working area, the algorithm and the block diagram of the program, which allows you to automatically normalized to explore parameters to speed up the process of measurement and process measurement data and assess their uncertainty.

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Відповідно до "Положення про порядок проведення атестації робочих місць за умовами праці", однією з актуальних проблем сучасної промсанітарії є комплексний контроль умов праці, заходів попередження травматизму, професійної і загальної захворюваності, метрологічного забезпечення служб охорони праці, організаційних структур оцінки умов праці на робочих місцях [1]. Рішення проблеми автоматизації

комплексного контролю санітарно-гігієнічного стану робочої зони та процесу обчислення оцінок вимірювань для лабораторій країни дозволить прискорити впровадження в практику, як основного чинника впливає на порівнянність результатів випробувань.

В систему комплексного аналізу та оцінки умов праці на підприємствах входить визначення фактичних комплексних значень санітарно-гігієнічних факторів на робочих місцях. Санітарно-гігієнічні фактори визначаються на основі інструментальних вимірювань відповідних величин. Разом з тим проведення комплексного контролю ускладнюється тим, що всі вимірювання, які пов'язані з атестацією робочих місць, повинні виконуватися в процесі роботи, тобто при проведенні виробничих процесів відповідно до технологічного регламенту, при справних і ефективно діючих засобах індивідуального та колективного захисту та засобами вимірювань, які зазначені у відповідних нормативних документах на методи вимірювання. Обчислення, які проводяться при комплексному оцінюванні, вимагають значних ресурсів лабораторії, оскільки пов'язані з довідковими даними математичної статистики та мають багато обчислень. Очевидно, що комплексний контроль санітарно-гігієнічних факторів та обчислювальна сторона оцінювання вимірювань на сучасному етапі повинні бути автоматизовані. Існуюче програмне забезпечення (ПЗ), яке використовується в більшості лабораторій охорони довкілля та промсанітарії не дозволяє оперативно і правильно отримання значень комплексного показника санітарно-гігієнічного стану робочої зони та оцінити точність цього показника. Враховуючи сказане дослідження, присвячені автоматизації комплексного контролю параметрів є актуальними.

У статті наведенні дослідження по розробці програмного забезпечення для автоматизації комплексного контролю санітарно-гігієнічного стану робочої зони, з урахуванням невизначеності величини комплексного параметру, до якого входять параметри мікроклімату, шуму, вібрації та інших виробничих факторів. При обчисленнях оцінок вимірюваних параметрів враховувались вимоги нормативних документів [2-3], які забезпечують достовірні вимірювання в режимі реального часу як власне фізичних факторів, так і комплексний показників (інтегрального)

впливу факторів на людину, з забезпеченням мінімізації можливих суб'єктивних помилок, пов'язаних з недостатньою кваліфікацією спостерігача.

2. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Існуючі програмні комплекси систем автоматизованого контролю санітарно-гігієнічних факторів призначені для обчислення норм і класів факторів, оформлення результатів спеціальної оцінки умов праці, також для автоматизації трудомістких процедур та оптимізації документообігу при проведенні атестації робочих місць до вимог нормативів, але недостатньо пристосовані для комплексної оцінки санітарно-гігієнічних факторів

Так, наприклад, програмне забезпечення систем автоматизованого моніторингу виробничих факторів для проведення атестації робочих місць з метою сертифікації робіт з охорони праці, розробником якого є ТОВ НДЦ «ФАПРОКС» Сибірський центр безпеки праці [4]. Обчислення норм і класів факторів здійснюється програмою автоматично. При цьому обсяг врахованих параметрів максимально наближений до вимог нормативів. Це дозволяє професійно проводити оцінку факторів, витративши мінімум зусиль. Недоліком цієї програми є відсутність можливості автоматизації всіх етапів атестації робочих місць.

Програмний комплекс «Азимут» [5] розроблений фахівцями ФГУП «НИТКИ ім. А.П. Александрова» для оцінки впливу виробничих факторів робочого середовища і трудового процесу на робочому місці персоналу підприємств та установ. Комплекс використовується також для автоматизації трудомістких процедур та оптимізації документообігу при проведенні атестації робочих місць за умовами праці відповідно до вимог сучасної нормативної бази з охорони праці, але в ньому відсутня можливість комплексної оцінки результатів контролю.

Програмний комплекс АТЕСТАЦІЯ-5.1 [6] призначений для оформлення результатів спеціальної оцінки умов праці. Програма дозволяє обробляти результати вимірювань або обстежень за алгоритмами, реалізованим у відповідності з нормативними документами і готувати пакет документів (протоколи, карти, зведені підсумкові документи) за спеціальною оцінкою умов праці.

Такий програмний продукт не придатний для проведення комплексного контролю санітарно-гігієнічних факторів. Він здійснює тільки обробку отриманих даних та оформлення результатів.

В основному такі програмні продукти мають доволі вузьку спеціалізацію та не придатні до застосування у апаратній частині системи комплексного контролю санітарно-гігієнічних факторів.

3. ФОРМУЛЮВАННЯ МЕТИ СТАТТІ

Метою статі є розробка програмного забезпечення для автоматизованого контролю комплексного показника санітарно-гігієнічного стану робочої зони.

4. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Програмне забезпечення SaNComplex 1.0 призначено для комплексного контролю санітарно-гігієнічних факторів шляхом реєстрації, візуалізації, обробки та зберігання аналогових і цифрових сигналів, записаних за допомогою різних пристроїв збору даних по санітарно-гігієнічному стану робочої зони, і дозволяє використовувати персональний комп'ютер у якості комплексу стандартних вимірювальних і реєструючих приладів. Алгоритм роботи ПЗ автоматизованої системи контролю санітарно-гігієнічного стану робочої зони представлений на рис. 1.

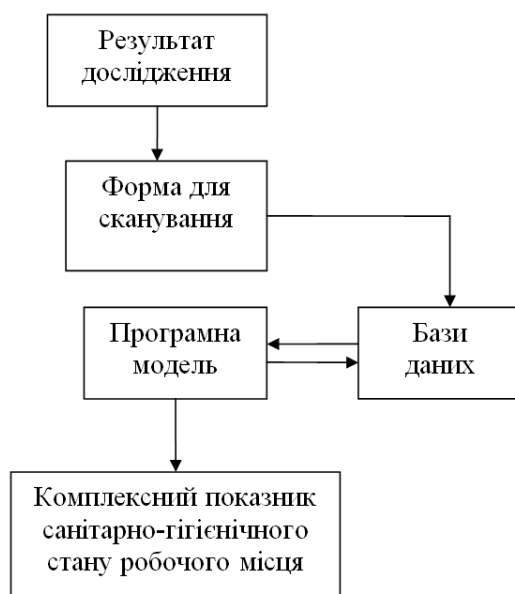


Рисунок 1 – Алгоритм роботи програми

Алгоритм включає введення вимірювальних даних, форми для сканування даних для бази даних, програмної моделі та комплексного показника санітарно-гігієнічного стану робочого місця.

ПЗ має багатоканальний режим підключення приладів і датчиків за допомогою кнопки пошуку приладів, підключення та відключення пристрою, список виявлених доступних приладів. У списку відображаються як локально підключені (USB-кабелем до комп'ютера), так і виявлені в мережі пристрою.

Введення вимірювальних даних (шляхом сканування даних з приладів, а також в «ручну»), запис вимірювальних даних, подання на екрані вимірювальних значень.

Програмне забезпечення містить розширювану бібліотеку драйверів для різних пристроїв.

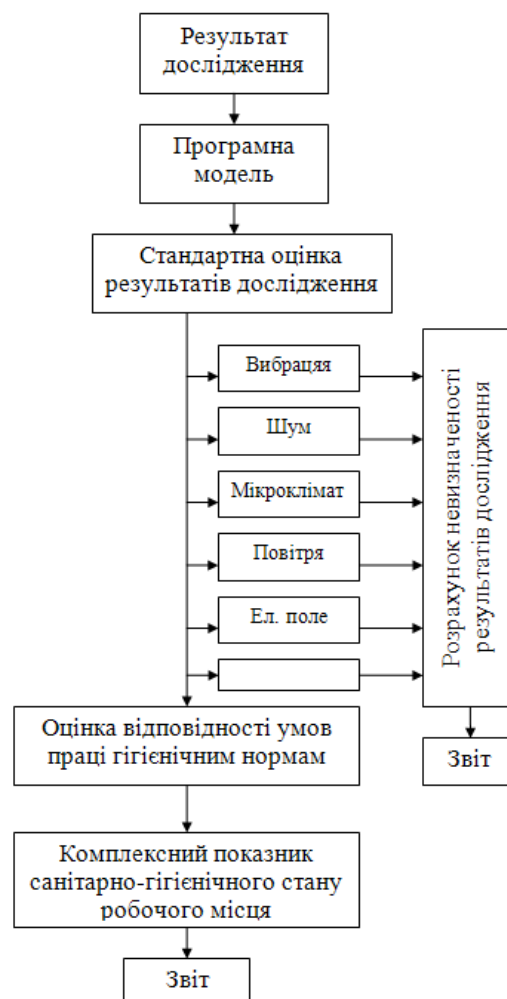


Рисунок 2 – Структурна схема роботи ПЗ

ПЗ дозволяє одночасно підключати кілька приладів і відповідно, знімати вимірювання з декількох каналів. Типи даних, вимірюваних різними каналами, можуть збігатися або бути різні.

Можливість створення бази даних для великої кількості вимірювальних величин та роботу з єдиною базою даних.

Перегляд архівів на екрані монітора в табличному і графічному вигляді;

Програмна модель дозволяє обробити результати дослідження стандартної оцінкою, розрахувати невизначеності вимірюваних параметрів, сформувати візуальне та графічне представлення відхилення від норм отриманих даних.

Вивести комплексний показник санітарно-гігієнічного стану робочої зони

Структурна схема бази даних представлена на рис. 3., містить базу даних ЗВТ (засобів вимірювальної техніки, засобів автоматизації і датчиків), норм (Directive ЕС і ДСН України), а також базу даних, що зберігає дані про значення вимірюваної величини.

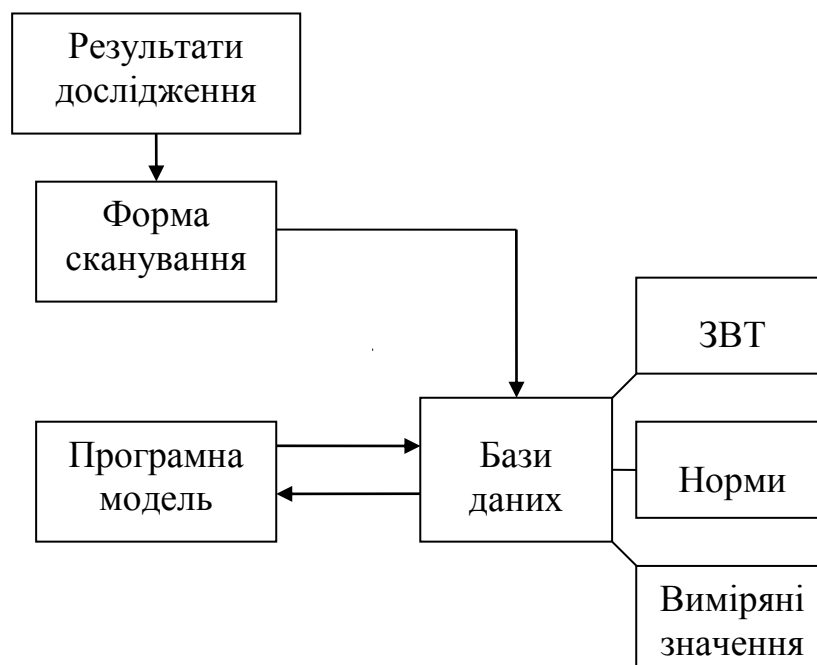


Рисунок 3 – Структурна схема бази даних

5. ОПИС СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Практичне застосування програми проводилося у інформаційно-виміральної системи контролю нормованих параметрів виробничих факторів. В роботі [7] представлені результати досліджень по створенню інформаційно-виміральної системи контролю нормованих параметрів виробничих факторів. Ця система дозволяє скоротити час на проведення вимірювання та обробку результатів обстеження робочого місця за рахунок розширення числа виконуваних функцій, а також підвищити точність вимірювань і продуктивність вимірвальних операцій. Система контролю санітарно-гігієнічного стану робочої зони складається з, цифровими засобами вимірювань, датчиків, узгоджувальний пристрій (УП), аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), пристрій передачі даних (ППД), комп'ютера з розробленим нами спеціалізованим програмним забезпеченням. Застосування комп'ютера в комплексі з спеціалізованим ПЗ дає можливість автоматизувати процес вимірювання та обробки результатів, спростити умови використання різних вимірвальних приладів, дає можливість визначення комплексного показника санітарно-гігієнічного стану робочої зони.

6. ВИСНОВКИ

Запропонований програмний продукт дозволяє автоматизувати та прискорити процес контролю комплексного показника санітарно-гігієнічного стану робочої зони за допомогою інформаційно-виміральної системи контролю нормованих параметрів виробничих факторів. Застосування розроблених програмних методів обробки виміральної інформації також дає можливість обробляти результати за методиками, які дозволяють збільшити точність і достовірність отриманих результатів та розширити діапазон вимірювань.

Список використаних джерел: 1. Положення про порядок проведення атестації робочих місць за умовами праці. [Електронний ресурс] // Загл. с екрана. – 2015. – Режим доступа: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/442-92-%D0%BF>; 2. Санітарні норми виробничих приміщень: ДСН 3.3.6.042-1999. [Електронний ресурс] // Загл. с екрана. – 2015. – Режим доступа: http://nbuviap.gov.ua/images/nub/Dmap/15_sanitar%20normy%20mikroklimatu.pdf; 3. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку: ДСН 3.3.6.037-1999. [Електронний ресурс] // Загл. с екрана. – 2015. – Режим доступа:

<http://ecopravo.org.ua/2011/07/14/dsn-3-3-6-037-99>; 4. Компьютерная программа «Аттестация рабочих мест по условиям труда на предприятиях». [Электронный ресурс] // Загл. с экрана. – 2015. – Режим доступа: <http://www.sibcbt.ru/nashi-uslugi/drugie-uslugi/programnoe-obespechenie>; 5. Программный комплекс «Азимут». [Электронный ресурс] // Загл. с экрана. – 2015. – Режим доступа: http://www.niti.ru/2_activity/2_1_commercial_activity/2_1_2_facility/us_2_azimut.pdf ; 6. Программный комплекс "АТТЕСТАЦИЯ-5.1 (СОУТ)". [Электронный ресурс] // Загл. с экрана. – 2015. – Режим доступа: <http://ekosf.ru/programma-attestatsiya-5-pk/programma-attestatsiya-5-1-sout>; 7. В. Л. Костенко Информационно-измерительная система контроля нормируемых параметров промышленных факторов [Текст] / В. Л. Костенко, Е. Д. Поперека, та ін.// Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – №3. – С. 51–56 .

Bibliography (transliterated): 1. Polozhennja pro porjadok provedennja atestacii robochih mis' za umovami pracj. [Jelektronnyj resurs] // Zagl. s jekrana. – 2015. – Rezhim dostupa: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/442-92-%D0%BF>; 2. Sanitarni normi virobnichih primishhen': DSN 3.3.6.042-1999. [Jelektronnyj resurs] // Zagl. s jekrana.– 2015. – Rezhim dostupa: http://nbuviap.gov.ua/images/nub/Dmap/15_sanitar%20normy%20mikroklimatu.pdf; 3. Sanitarni normi virobnichogo shumu, ul'trazvuku ta infrazvuku: DSN 3.3.6.037-1999. [Jelektronnyj resurs] // Zagl. s jekrana. – 2015. – Rezhim dostupa: <http://ecopravo.org.ua/2011/07/14/dsn-3-3-6-037-99>; 4. Komp'juternaja programma «Аттестация рабочих мест по условиям труда на предприятиях». [Jelektronnyj resurs] // Zagl. s jekrana. – 2015. – Rezhim dostupa: <http://www.sibcbt.ru/nashi-uslugi/drugie-uslugi/programnoe-obespechenie>; 5. Programnij kompleks «Азимут». [Jelektronnyj resurs] // Zagl. s jekrana. – 2015. – Rezhim dostupa: http://www.niti.ru/2_activity/2_1_commercial_activity/2_1_2_facility/us_2_azimut.pdf ; 6. Programmnyj kompleks "АТТЕСТАЦИЯ-5.1 (СОУТ)". [Jelektronnyj resurs] // Zagl. s jekrana. – 2015. – Rezhim dostupa: <http://ekosf.ru/programma-attestatsiya-5-pk/programma-attestatsiya-5-1-sout>; 7. V. L. Kostenko Informacionno-izmeritel'naja sistema kontrolja normiruemyh parametrov promyshlennyh faktorov [Tekst] / V. L. Kostenko, E. D. Popereka, ta in.// Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. – 2014. – №3. – С. 51–56 .

УДК 007.3 : 004.942

И.И. СТАНОВСКАЯ, канд. техн. наук,
И.Н. ЩЕДРОВ,
Е.И. БЕРЕЗОВСКАЯ,
В.В. ДОБРОВОЛЬСКАЯ, Одесса, Украина

УПРАВЛЕНИЕ ЛАТЕНТНЫМИ РИСКАМИ В ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Показано, что ранняя профилактика латентных рисков в технологии машиностроения может значительно снизить общие затраты на управление рисками, в том числе, и на компенсацию их последствий. Выполнена классификация латентных стадий жизненного цикла рискованной ситуации. Предложена система управления рискованной ситуацией при смешанных рисках.

Показано, що ранішня профілактика латентних ризиків в технології машинобудування може значно знизити загальні витрати на управління ризиками, в тому числі, і на компенсацію їхніх наслідків. Виконана класифікація латентних стадій життєвого циклу ризикової ситуації. Запропонована система управління ризиковою ситуацією при змішаних ризиках.

It is shown that early prevention of latent risks in manufacturing engineering can significantly reduce the overall costs of risk management, including compensation and their consequences. The classification of the latent stages of the life cycle of the risk situation. The system of management of risk situations with mixed risk.

В любой области человеческой деятельности, где могут возникать какие-либо проблемы (а это, – практически, все известные области), важнейшим методом борьбы с последними является *профилактика* [1]. Не составляет исключение и такой «опасный» вид деятельности, как управление проектами, в котором преодоление последствий рискованных событий зачастую превращается в балансирование между объемом работ, ресурсами (такими как деньги, труд, материалы, энергия, пространство и др.), временем и качеством. Не случайно ключевым фактором успеха

проектного управління является минимизация рисков и отклонений от четкого заранее определенного плана, эффективное управление в условиях внутренних по отношению к проекту и внешних нежелательных изменений, важнейшей составляющей которого и является профилактика.

К сожалению, несмотря на очевидную значимость, в принятой на сегодняшний день общей схеме управления рисками проекта [2] отсутствует подраздел профилактики и не ставятся задачи «работы» с рисками на их скрытой, «латентной» стадии.

Риск проекта – это неопределенное событие или условие, которое будет иметь положительное или отрицательное воздействие как минимум на одну цель проекта, *если оно произойдет* [3]. Причиной возникновения рисков являются неопределенности, существующие в каждом проекте. Риски разделяют на «известные» – те, которые заранее определены, оценены, для которых возможно планирование, и риски «неизвестные», – те, которые не идентифицированы и не могут быть спрогнозированы [2].

Риски также можно разделить на *внезапные* (известные и неизвестные), – их нельзя было предвидеть ни по каким скрытым «предвестникам беды», и *внезапно-предсказуемые*, – их можно было предвидеть при надлежащей организации профилактических работ [4].

Примером первых могут служить землетрясения в сейсмической зоне, вторых – оползневые явления в зоне прибрежного строительства: они накапливаются годами, и признаки этого накопления (если организовать за ними специальный мониторинг) могут быть количественно оценены и использованы при профилактике.

Цель управления рисками проекта – повышение вероятности возникновения и воздействия благоприятных событий и снижение вероятности возникновения и воздействия неблагоприятных для проекта событий.

Как известно, управление рисками обычно включает процедуру идентификации рисков – определение рисков, способных повлиять на проект, и документирование их характеристик [5, 6]. В период идентификации рисков на основе известных факторов внешней среды предприятия, активов организационного процесса, описания содержания проекта, а также планов управления проектом и рисками проекта создается

реестр рисков, который корректируется при последующем количественном и качественном анализе последних [2].

Количественный анализ рисков – количественный анализ потенциального влияния идентифицированных рисков на общие цели проекта.

Качественный анализ рисков – расположение рисков по степени их приоритета для дальнейшего анализа или обработки путем оценки и суммирования вероятности их возникновения и воздействия на проект.

Планирование реагирования на риски – разработка возможных вариантов и действий, способствующих повышению благоприятных возможностей и снижению угроз для достижения целей проекта.

Мониторинг и управление рисками – отслеживание идентифицированных рисков, мониторинг остаточных рисков, идентификация новых рисков, исполнение планов реагирования на риски и оценка их эффективности на протяжении жизненного цикла проекта.

Целью настоящей работы является разработка системы профилактических мероприятий по повышению информативности латентного периода известных и неизвестных рисков для повышения эффективности управления рисками в проектной деятельности.

Для достижения этой цели в работе были решены следующие задачи: выполнен анализ последних достижений и публикаций в области профилактики и управления латентными рисками; введено понятие «рисковая ситуация» – состояние и любое изменение в структуре или параметрах проекта, связанное с изменением вероятности наступления рискового события; для численной оценки рисковой ситуации определено понятие «значения рисковых параметров» – параметров «подозрительных» на увеличение вероятности возникновения того или иного рискового события; разработана схема системы профилактических мероприятий при управлении смешанными (известными и неизвестными) рисками, включающая рекомендации по раскрытию латентности и прогнозу развития рисковых ситуаций в проекте; разработана система поддержки принятия проектных решений в условиях продроводействия латентным рискам «RILAM».

По аналогии с медициной профилактика рисковых событий должна

предусматривать такие направления деятельности по отношению к объекту проектного управления: использование, по возможности, современных «фирменных» технологий и оборудования; использование, по возможности, фирменных комплектующих расходных материалов и запасных частей; использование проверенного, хорошо обученного персонала соответствующего задачам квалификации; планирование реальных сроков выполнения проекта и его частей; планирование проверенных надежных поставщиков активов, необходимых для реализации и успешного завершения проекта; организация контроля за состоянием подсистем проекта на протяжении всего срока проекта; организация компенсации «предрисковых состояний» до того, как рисковое событие произошло; планирование средств, выделяемых на управление рисками, достаточных для финансирования перечисленных направлений профилактики.

В соответствии с принятым определением и основами математической теории идентификации [7] задача идентификации рисков, т.е. а нашем случае, – задача отнесения заданного набора признаков к тому или иному виду риска, является, по существу, задачей классификации. В результате такой классификации формируется закрытый список *известных* рисков, создающих, пока они не произошли, некоторую *рисковую ситуацию*, за которой тщательно следит менеджер проекта на всем промежутке времени его реализации.

Рисковая ситуация – состояние и любое изменение в структуре или параметрах проекта, связанное с изменением вероятности наступления рискового события, даже если оно, в итоге, не произойдет (аналог – аварийная ситуация в дорожном движении).

Рисковая ситуация в управлении проектами развивается во времени, поэтому можно говорить о её ЖЦ, начало которого совпадает с началом проекта, а окончание, – или с окончанием проекта, или с временем наступления рискового события. Численная оценка рисковой ситуации может быть выполнена по значениям *рисковых параметров* – параметров «подозрительных» на увеличение вероятности возникновения того или иного рискового события. Наблюдение за рисковыми параметрами может привести к обнаружению плавных (увеличение напряжения) или

скачкообразных (появление трещины) изменений в них. Подобные изменения могут происходить как у параметров, «привязанных» к известным рискам, так и у параметров, которые в отношении к известным рискам не подозревались. Схема ЖЦ рискованной ситуации для каждого из рисков, входящих в плановый реестр, приведена на рис. 1.

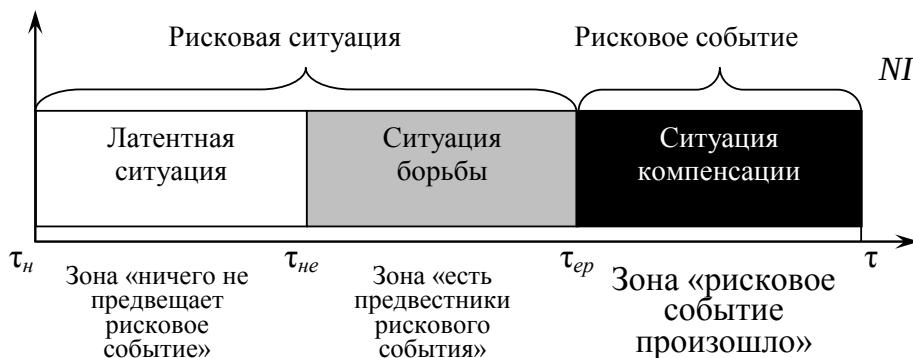


Рисунок 1 – Схема управления рискованной ситуацией для I -го риска при известных рисках

Задача управления проектами в этом случае: сдвинуть границу $\tau_{не}$ влево (по рисунку), а границу $\tau_{ер}$ – вправо.

Если множество известных видов рисков управления проектом конечно и полностью описано (т.е. система идентификации обучена), задача классификации таких рисков выглядит тривиальной.

К сожалению, как указывалось выше, проектная деятельность подвержена не только *известным* рискам из закрытого списка-реестра, но и *неизвестным*, не входящим в реестр, но не становящихся от этого менее опасными для достижения целей проекта.

Существенной особенностью классификации «неизвестных» рисков является то, что не все виды рисков к началу идентификации известны, т.е. у лица, занимающегося идентификацией, нет уверенности в том, что причиной проблем в управлении проектом не является какой-нибудь новый, не описанный ранее риск, класс которого еще необходимо создать.

Рассмотрим эту проблему с точки зрения управления затратами на компенсацию рискованных событий. В [2] рекомендуется оценивать затраты на рискованные события R как произведение затрат на их компенсацию $З_k$ на вероятность наступления рискованной ситуации p :

$$R = З_k \cdot p \quad (1)$$

Выражение (1), когда рисковая ситуация уже наступила, распадается на два очевидных: $p = 1$; $R = Z_k$, что позволяет точно определить фактические затраты на риск. В качестве прогнозного это выражение малоинформативно, т.к. нам заранее не известны ни p , ни Z_k . Единственное, что можно утверждать наверняка, – если рисковое событие до окончания срока проекта так и не наступит (при этом p всегда будет меньше единицы), то затраты на его компенсацию будут равны нулю:

$$R = \xi C_{\xi} \cdot p \Big|_{p(1; \xi=0} = 0, \quad (2)$$

где ξ – бинарный (0; 1) множитель, равный нулю, если рисковое событие не наступило. Достижение соотношения (2) как раз и является задачей профилактики: нелегко убирать, – легче не сорить, нелегко компенсировать рисковые события, легче их не допускать! Единственное, на что можно здесь влиять во время управления проектом, в соответствии с (2), является вероятность наступления рискового события p .

Введем понятие «жизненный цикл вероятности наступления рискового события» и построим его график для известного планового риска (рис. 2 а). У известного планового риска гипотетическая вероятность $p_{\text{ип}}$ является константой на протяжении ее ЖЦ, если только наступление гипотетического рискового события не превращает эту вероятность в единицу.

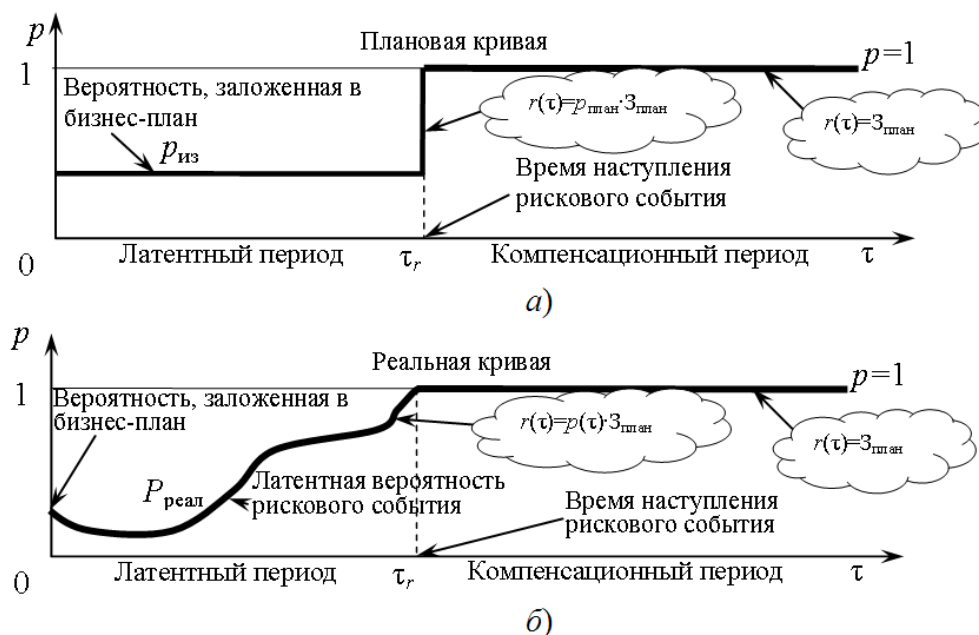


Рисунок 2 – Схемы жизненных циклов вероятности наступления рискового события известных проектных рисков: планового (а) и реального (б)

Только в редких случаях источником априорной информации о величине $p_{\text{ип}}$ может быть статистический эксперимент, – гораздо чаще при планировании проекта пользуются весьма приблизительными экспертными оценками, справочниками о вероятности природогенных катастроф, бизнес-прогнозом и т.п. Таким же гипотетическими являются и плановые затраты на компенсацию риска, – можно утверждать, что эта величина также носит вероятностный характер. Понятно, что вероятность фактического риска, оставаясь полностью или частично скрытой от наблюдателя, не совпадает с плановой, – более того, она может существенно изменяться в обе стороны на протяжении латентного периода ее ЖЦ (рис. 2 б). Что касается неизвестных рисков, то они по определению всегда неожиданны, а значит ожидаемая вероятность до того, как этот риск реализуется, равна нулю (рис. 3).



Рисунок 3 – Схема жизненного цикла вероятности неизвестного проектного риска

Латентная ситуация для смешанных рисков «дважды латентна», – неизвестно не только само изменение, но неизвестно также и то, в чём оно состоит «физически»!

Схема системы профилактических мероприятий при управлении смешанными рисками (рис. 4) отличается от схемы, приведенной на рис. 1, более глубоким анализом латентной ситуации, когда ещё ничего не произошло: контролируемые параметры неизменны, рискованные события не наступили.

В основе таких мероприятий – решенная задача раскрытия латентности событий в сложных технических системах в виде автоматизированной информационной системы выявления, диагностики и компенсации латентных нарушений в работе сложных объектов [8, 9]. В качестве особенности системы – современные методы прогнозирования развития таких событий в течение жизненного цикла проекта [10 – 12].

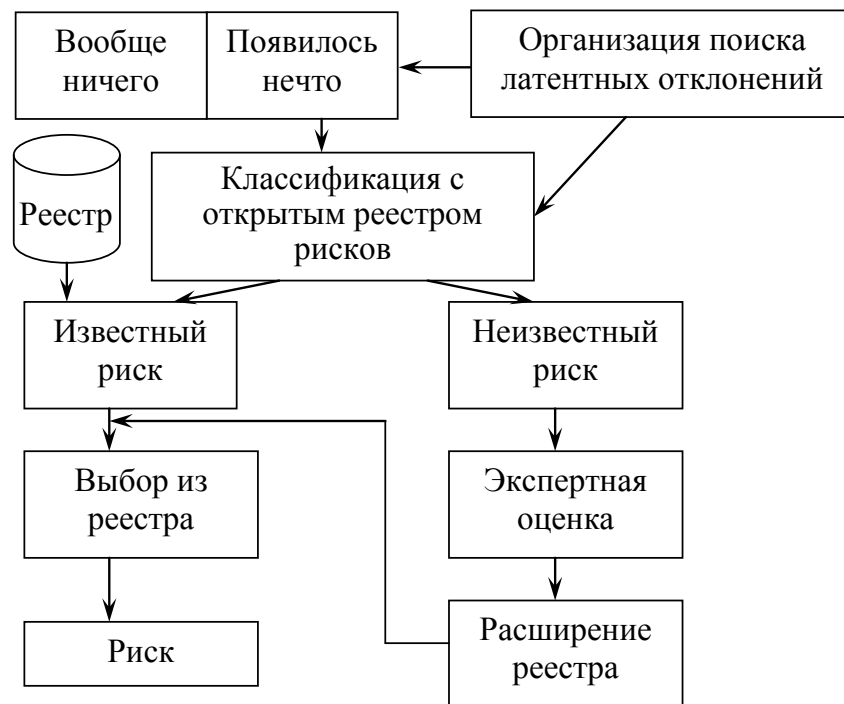


Рисунок 4 – Схема системы профилактических мероприятий при управлении смешанными рисками

Большие резервы в решении этой проблемы скрываются на пути использования для профилактики и борьбы с латентными рисками современных информационных технологий, т.к. дополнительная информация о проекте создает новые возможности для автоматического выявления и диагностики, а также для устранения причин латентных рисков.

Анализом целей и задач проектного управления показано, что ранняя профилактика латентных рисков может значительно снизить общие затраты на управление рисками, в том числе, и на компенсацию их последствий. В работе выполнена классификация латентных стадий жизненного цикла рисков ситуации и на ее основе предложена система управления рисковой ситуацией при смешанных рисках.

Метод профилактики и управления латентными рисками, предложенный в настоящей работе, лёг в основу создания подсистемы «LARIS» (*latent risks*) общей системы поддержки принятия проектных решений «RILAM» (*latent multiplicative risks*), предназначенной для управления проектом, который подвержен опасности высоковероятных

латентных рисков. Компьютерная симуляция работы СППР «RILAM» и её практические испытания в одесском Холдинге «Союз» прошли с положительным технико-экономическим эффектом.

Список использованных источников: 1. Лучкевич В.С. Основы социальной медицины и управления здравоохранением. – СПб : СПбГМА, 1997. – 184 с. 2. Даве В. Руководство к своду знаний по управлению проектами (руководство pmbok). Пятое издание / В. Даве, Д. Кестел. – project management institute, 2013. – 614 с. 3. Гогунский В.Д. Управление комплексными рисками программы сопровождения систем аварийной защиты объектов ответственного назначения / В.Д. Гогунский, Т.В. Бирик, И.И. Становская // Збірник наукових праць національного університету кораблебудування. – Миколаїв : НУК, 2012. – № 2. – с. 104-108. 4. Становский А. Л. Идентификация латентных рисков при управлении проектом создания международного студенческого центра рекреации и туризма / А.Л. Становский, И.Н. Щедров, И.Н. Гурьев // Матеріали Х міжнародної науково-практичної конференції «Управління проектами: стан та перспективи». – Миколаїв : НУК, 2014. – с. 279 – 281. 5. Гогунский В. Д. Управление комплексными рисками проекта сопровождения систем аварийной защиты объектов ответственного назначения / В.Д. Гогунский, Т.В. Бирик, И.И. Становская // Вестник национального университета кораблестроения. – Николаев : НУК, 2012. – № 2. – с. 104-108. 6. Кошкин В. К. Управление рисками в банковской системе / В.К. Кошкин, Л.Л. Кошкина // Матеріали 7-ї міжнародної науково-практичної конференції «Управління проектами: стан та перспективи». – Миколаїв, 20–23 вересня 2011 р. – с. 160-161. 7. Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентификации. – М. : Наука, 1984. – 320 с. 8. Налева Г.В. Диагностика латентных нарушений процесса получения композитных инструментальных материалов // Теорія і практика процесів. Подрібнення, розділення, змішування і ущільнення: збірник наукових праць. – Одеса: ОНМА, 2005. – Вип. 11. – с. 71 – 78. 9. Левченко А.А. Идентификация диагностической информации о техническом состоянии объекта при отсутствии априорной информации о вероятностных характеристиках случайных факторов / Левченко А.А., Фролов В.Я., Яковлев М.Ю. // Сборник научных трудов государственного университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 1999. – Вып. 5. – с. 135 – 139. 10. Становський О.Л. Прогнозування розвитку підприємства в умовах «правил гри», що змінюються / О.Л. Становський, О.С. Савельєва, Г.В. Налева / Труды Одесского политехнического университета. – 2003. – № 1(19). – с. 116-118. 11. Дубровин В.И. Интеллектуальные средства диагностики и прогнозирования надежности авиадвигателей // В.И. Дубровин, С.А. Субботин, А.В. Богуслав и др. – Запорожье : ОАО «Моторсич», 2003. – 279 с. 12. Бассвиль М. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем / М. Бассвиль, А. Вилски, А. Банвенист. – М. : Мир, 1989. – 278 с.

Bibliography (transliterated): 1. Luchkevich V.S. Osnovy social'noj mediciny i upravlenija zdavoohraneniem. – SPb : SPbGMA, 1997. – 184 s. 2. Dave V. Rukovodstvo k svodu znanij po upravleniju proektami (rukovodstvo pmbok).

Pjatoe izdanie / V. Dave, D. Kestel. – project management institute, 2013. – 614 s. 3. Gogunskij V.D. Upravlenie kompleksnymi riskami programmy soprovozhdenija sistem avarijnoj zashhity ob#ektov otvetstvennogo naznachenija / V.D. Gogunskij, T.V. Bibik, I.I. Stanovskaja // Zbirnik naukovih prac' nacional'nogo universitetu korablebuduvannja. – Mikolaïv : NUK, 2012. – № 2. – s. 104 – 108. 4. Stanovskij A. L. Identifikacija latentnyh riskov pri upravlenii proektom sozdanija mezhdunarodnogo studencheskogo centra rekreacii i turizma / A.L. Stanovskij, I.N. Shhedrov, I.N. Gur'ev // Materiali H mizhnarodnoï naukovopraktichnoï konferencii «Upravlinnja proektami: stan ta perspektivi». – Mikolaïv : NUK, 2014. – s. 279 – 281. 5. Gogunskij V. D. Upravlenie kompleksnymi riskami proekta soprovozhdenija sistem avarijnoj zashhity ob#ektov otvetstvennogo naznachenija / V.D. Gogunskij, T.V. Bibik, I.I. Stanovskaja // Vestnik nacional'nogo universiteta korablestroenija. – Nikolaev : NUK, 2012. – № 2. – s. 104 – 108. 6. Koshkin V. K. Upravlenie riskami v bankovskoj sisteme / V.K. Koshkin, L.L. Koshkina // Materiali 7-i mizhnarodnoï naukovopraktichnoï konferencii «Upravlinnja proektami: stan ta perspektivi». – Mikolaïv, 20–23 veresnja 2011 r. – s. 160 – 161. 7. Cypkin Ja.Z. Osnovy informacionnoj teorii identifikacii. – M. : Nauka, 1984. – 320 s. 8. Naleva G.V. Diagnostika latentnyh narushenij processa poluchenija kompozitnyh instrumental'nyh materialov // Teorija i praktika procesiv. Podribnennja, rozdilennja, zmishuvannja i ushil'nennja: zbirnik naukovih prac'. – Odesa: ONMA, 2005. – Vip. 11. – s. 71 – 78. 9. Levchenko A.A. Identifikacija diagnosticheskoi informacii o tehničeskoi sostojanii ob#ekta pri otsutstvii apriornoj informacii o verojatnostnyh harakteristikah sluchajnyh faktorov / Levchenko A.A., Frolov V.Ja., Jakovlev M.Ju. // Sbornik nauchnyh trudov gosudarstvennogo universiteta im. N.E. Zhukovskogo «HAI». – 1999. – Vyp. 5. – s. 135 – 139. 10. Stanovskij O.L. Prognozuvannja rozvitku pidpriemstva v umovah «pravil gri», shho zminjutsja / O.L. Stanovskij, O.S. Savel'eva, G.V. Naleva / Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta. – 2003. – № 1(19). – s. 116 – 118. 11. Dubrovin V.I. Intel'ektual'nye sredstva diagnostiki i prognozirovanija nadezhnosti aviadvigatelej // V.I. Dubrovin, S.A. Subbotin, A.V. Boguslav i dr. – Zaporozh'e : OAO «Motorsich», 2003. – 279 s. 12. Bassvil' M. Obnaruzhenie izmenenija svojstv signalov i dinamicheskijh sistem / M. Bassvil', A. Viski, A. Banvenist. – M. : Mir, 1989. – 278 s

УДК. 662.997.05(043)

В.М. ТИГАРЕВ, канд. техн. наук,
В.М. ТОНКОНОГИЙ, д-р. техн. наук,
Е.И. САПОЖКОВ, Одесса, Украина

СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ В САПР INVENTOR

Пошук джерел енергії для задоволення зростаючого мирового запиту, є основним викликом для суспільства наступних половини століття. Завдання складається у перетворенні сонячного світла у електричество за допомогою фотоелектричних сонячних елементів при цьому значно знизив співвідношення затрат \$/ватт, сонячної енергії яка була одержана. Створена система моделювання та проектування сонячних батарей (трекерів) трьох типів у САПР Inventor.

Поиск источников энергии для удовлетворения, растущего мирового спроса, является основным вызовом для общества следующей половины столетия. Задача состоит в преобразовании солнечного света в электричество с помощью фотоэлектрических солнечных элементов, при этом значительно снизив соотношение затрат \$/ватт, получаемой солнечной электроэнергии. Создана система моделирования и проектирования солнечных батарей (трекеров) трех типов в САПР Inventor.

Finding energy sources to satisfy the worlds growing demand is one of societys foremost challenges for the next half-century. The challenge in converting sunlight to electricity via photovoltaic solar cells is dramatically reducing \$/watt of delivered solar electricity. Created system modeling and design of solar panels (trackers) three types in CAD Inventor.

Вступление. Одной из наиболее важных проблем XXI века, является проблема поиска альтернативных источников энергии, сжигаемые виды топлива, в обозримом будущем будут исчерпаны, и необходимость поиска возобновляемых источников становится актуальной уже сейчас. Над решением такой глобальной проблемы трудятся инженеры и ученые многих ведущих университетов мира, все размышления сводятся к одному – научиться эффективно использовать энергию солнца в качестве

основного источника энергии для нашей планеты. Теоретические расчеты показывают, что если 0,16% земной поверхности покрыть эффективными солнечными батареями (СБ) с высоким КПД, то такие батареи смогли бы выдавать энергию равную 20 ТВт, что примерно в два раза превышает энергию, получаемую при сжигании газа и нефти всех стран мира вместе взятых.

Из возобновляемых источников энергии, солнечная, по масштабам, видится наиболее перспективной, уже с современными технологиями вполне реально качественно перейти на солнечную энергетику. Солнечная энергия не только может стать наиболее эффективным источником энергии на нашей планете, она также является экологически чистым и в масштабе человеческой жизни, безграничным источником энергии.

ПОСТАНОВКА ЗАДАНИЯ

Постановка задачи. Какие же главные препятствия стоят перед человечеством, чтобы начать эффективно использовать солнечную энергетику? Одной из главных причин, по которым солнечные батареи не используются как основной источник энергии, является их дороговизна и долгий срок окупаемости. Это связано с тем, что современные технологии пока не способны выдавать необходимый КПД, для эффективного использования солнечной энергии. На отечественном рынке солнечная энергетика – это довольно затратный источник энергии, если посмотреть на западные страны, там дела обстоят намного лучше, это связано с тем, что правительство западных стран, активно поддерживает движение за чистую энергию, в правительствах таких стран присутствуют партии, которые активно выступают за увеличение субсидирования чистой и экологической энергии, в том числе и энергии солнца. Не только компании, желающие оборудовать свои здания и офисы солнечными панелями, получают должную денежную поддержку от государства, но также и обычный житель не останется обделённым, в первую очередь люди использующие чистые источники энергии не облагаются налогами и с должной правительственной помощью могут за просто себе установить СБ, а также обслуживать их.

Вторым главным недостатком СБ является зависимость от погодных условий, уровня осадков, для статичных систем, проблемой так же является и постоянно меняющееся положение солнца, что не позволяет в полной мере использовать энергию света. Для многих стран использование солнечной энергии является затруднительным, т.к. поток световой энергии на разных географических широтах разный.

Решение первой проблемы возможно следующими способами:

- сокращение затрат на производство – создание автоматизированных цехов по сборке СБ, для обслуживания которых, необходимы минимальные трудовые затраты;

- удешевление кремния путем замены монокристалла кремния на поликристалл и мультикристалл кремния;

Для повышения КПД солнечных элементов можно:

- используя тандемные установки, многослойный фотоприемник на гетеропереходах, хотя это увеличивает стоимость;

- применяя, двусторонние фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), что незначительно улучшает эффективность;

- добавив различные концентраторы, которые наряду с увеличением фотоответа, сопровождаются повышением температуры элементов, что негативно влияет на КПД:

- введя систему слежения за Солнцем.

Последний вариант является наиболее приемлемым, так как даже при эффективной стационарной установке СБ проигрыш в вырабатываемой мощности на 50% больше, чем при непрерывном ориентировании на солнце. Следящая система (трекер) обеспечивает более равномерное генерирование электричества с восхода до захода солнца.

Результаты исследования.

Ориентирование на Солнце возможно с применением одноосных и двухосных систем, именуемые также трекерами.

Наибольшее развитие получили активные системы. Они применяются как для ориентирования солнечных батарей на земле, так и для ориентации в космических аппаратах.

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ПРИХОДЯЩЕЙ МОЩНОСТИ ПРЕДСТАВЛЕНЫ В РАБОТАХ [1, 2, 3]

Инсоляцией (от латинского *in solo* - выставляю на солнце) называется облучение параллельным пучком лучей, поступающих с направления солнечного диска. Инсоляция значительно изменяется при переходе от одной точки земной поверхности к другой. Инсоляция зависит еще от ряда немаловажных факторов:

- времени года, обуславливающего более малую освещенность и долготу дня зимой;
- времени суток, т.к. солнечные лучи в течении дня не одинаково эффективны, вдобавок лучи, падающие на поверхность солнечной батареи под очень малым углом, малопригодны для использования.

местных погодных условий (облачность, туман, дождь, снег, высокая температура).

Величиной, оказывающей влияние на интенсивность облучения фотоэлектрического модуля (ФМ), является угол падения солнечных лучей на её поверхность. Применение систем слежения позволит изменять угол в зависимости от положения Солнца, что увеличит количество пришедшей мощности на поверхность ФМ.

Для расчета интенсивности потока солнечного излучения, поступающего на наклонную лучепоглощающую поверхность, необходимо знать углы падения солнечных лучей на нее.

При прохождении атмосферы потоком солнечного излучения он теряет свою интенсивность из-за поглощения озоном, углекислым газом и водяным паром, а также рассеянием твердыми частицами. Рассеяние и поглощение увеличиваются с увеличением пути потока солнечных лучей, поэтому вводится поправочный коэффициент для аппроксимации:

$$K = 1,1254 - \frac{0,1366}{\sin \alpha} \quad (1)$$

где α - солнечная высота.

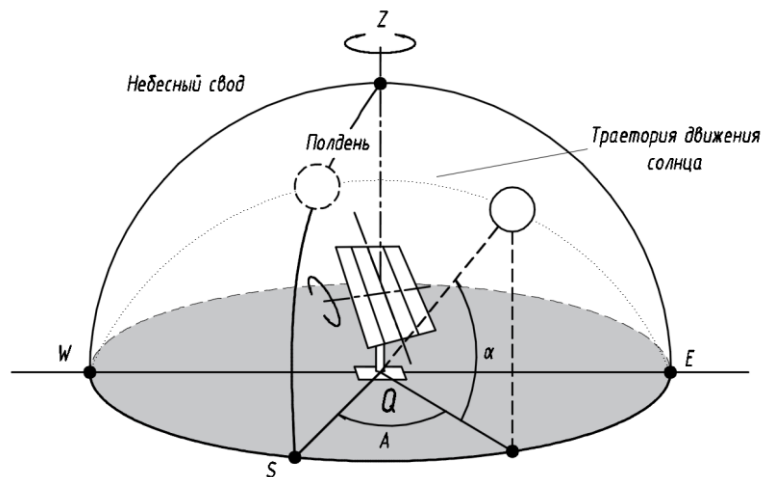


Рисунок 1 – Движение солнца по небосводу

Определим основные солнечные углы и их соотношения для различных способов слежения за солнцем.

ω - часовой угол, измеряется в градусах. Часовой угол увеличивается на 15 градусов каждый час и равен нулю в солнечный полдень.

$$\omega = 15(t_s - 12), \quad (2)$$

где t_s – солнечное время в часах;

δ – склонение, равняется угловому расстоянию на небесной сфере от плоскости небесного экватора до светила и выражается в градусах дуги. Склонение положительно к северу от небесного экватора и отрицательно к югу.

$$\sin \delta = 0.39795[0.98563(N - 173)] \quad (3)$$

где N – номер дня;

a - солнечная высота, определяется как угол между падающими лучами от солнца и горизонтальной плоскостью.

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \cos \varphi) \quad (4)$$

θ_z - зенитный угол, является дополнительным к солнечной высоте.

$$\theta_z = 90^\circ - \alpha$$

A - солнечный азимут. Это угол, измеренный по часовой стрелке в горизонтальной плоскости с севера. Измеряется в градусах.

$$A = \sin^{-1}\left(\frac{-\cos \varphi \sin \omega}{\cos \alpha}\right) \quad (5)$$

Для определения количества излучения, приходящегося на произвольно ориентированную площадку, введем понятия угла отслеживания θ , выражающего угол между направлением солнечных лучей вектор S и нормалью к площадке вектора N .

Косинус угла между падающими солнечными лучами и нормалью есть скалярное произведение этих двух единичных векторов: $\cos\theta_i = S \cdot N$

В системе с двумя осями слежения, ФМ всегда будет нормальна к солнцу. Поэтому эффект косинуса не вступает в силу: $\cos\theta_i = 1$

Приходящая мощность может быть рассчитана по формуле:

$$I_h = K \cdot I_0 \cdot \cos \theta_i, \quad (6)$$

где I_0 - солнечная константа, равная 1367 Вт/м^2 .

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ТРЕКЕРОВ.

Изучив особенности конструкции трекеров, были спроектированы основные виды солнечных систем.

Статическая конструкция представляет собой раму, угол которой рассчитывается на основании среднесезонного положения солнца. Рама состоит из алюминиевых профилей, на которые крепится солнечная панель.

Статическая система имеет ряд преимуществ по сравнению с автоматическими системами слежения. Во-первых, она проста в обслуживании, установка такой батареи происходит единоразово и не требует калибровки датчиков движения. Стоимость такой системы, в сравнении с автоматикой, значительно ниже, что и делает такие батареи более привлекательными для конечно покупателя.

Одноосевой трекер. Данная система часто применяется в СЭС, т.к. не требует сложной программной аппаратуры, проста в управлении и значительно дешевле аналогов, следящих за солнцем по двум координатам.

Устройство такого механизма состоит из поворотной рамы, вращение которой, возможно благодаря двигателю, работа которого регулируется автоматикой. Автоматика «следит» за местом расположения Солнца на небосводе и по мере его продвижения в западном направлении дает сигнал двигателю осуществлять поворот всех батарей.

Интересным выдается тот факт, что питание для двигателя идет от самих солнечных батарей. Слежение за солнцем делает само солнце, а это тоже экономия средств.

Двухосевой трекер – это электромеханический прибор, цель которого отслеживать перемещение источника света. Основное применение – изменение положения фотоэлектрических модулей (солнечных батарей) с целью получения максимального КПД. Именно при падении солнечного света под прямым углом достигается минимальное значение отражения, а следовательно — максимальное использование энергии лучей солнечной панелью.

Преимущество двухосевого солнечного трекера состоит в том, что размещенные на них солнечные батареи автоматически двигаются за солнцем в течении дня и меняют угол наклона в зависимости от времени года. А это — значительно увеличивает выработку электроэнергии по сравнению с неподвижно закрепленными солнечными панелями.

Перед созданием подсистемы проектирования была создана блок-схема, с детальным описанием программы.

Основной код програми был написан благодаря интегрированному в iLogic, языку програмування Visual Basic. Пользовательский интерфейс программы було розроблено в VB, а також благодаря редактору форм в САПР Inventor.

Программа розбита на три основных исполнительных правила:

- 1) работа со статической системой;
- 2) работа с одноосевой системой;
- 3) работа с двухосевой системой.

Каждое из правил содержит набор функций направленных на редактирование параметрической модели.

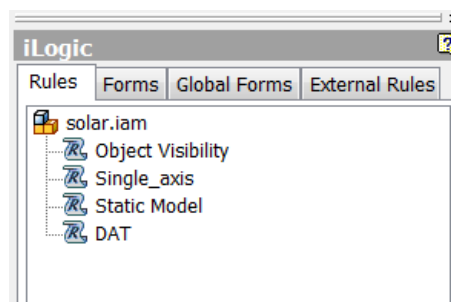


Рисунок 2 – Основні правила програми

Основные правила объединены в правило Object Visibility, которое контролирует видимость модели редактирования. Правила iLogic работают с переменными, которые задает сам пользователь и с переменными, которые система задает автоматически каждому из объектов. Каждое правило в iLogic представляет собой контейнер с переменными, которые связаны между собой условиями.

Блок редактирования статической системы разделен на компоненты редактирования: редактирование опорной конструкции, параметры солнечной батареи и заданием массивов.

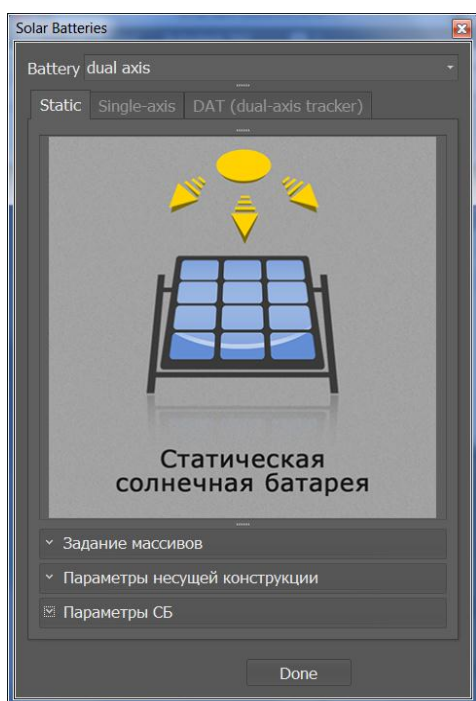


Рисунок 3 – Интерфейс редактирования статической системы

Рассмотрим работу с массивами:

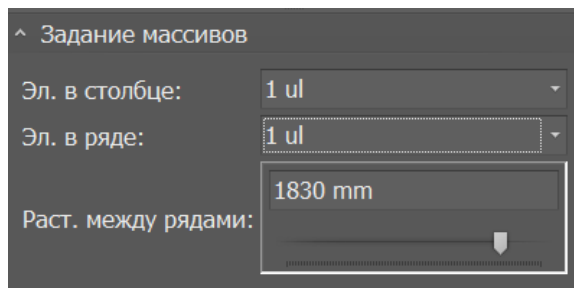


Рисунок 4 – Блок редактирования массивов статической системы

Благодаря использованию массивов, можно увеличить количество объектов в ряд и в столбец, а также изменить расстояние между ними.

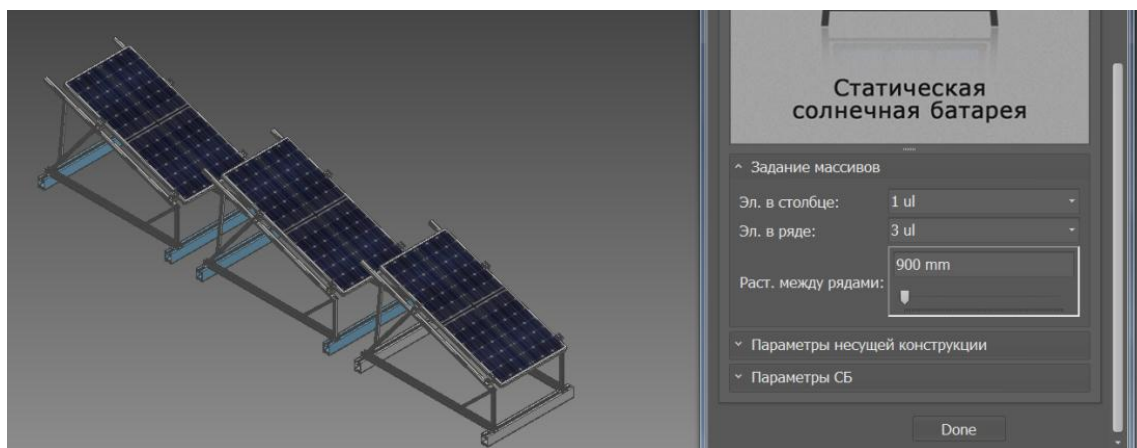


Рисунок 5 – Демонстрация работы с массивами

Следующий блок – редактирования опорной конструкции изменяет длину профиля опоры, возможность изменять высоту опоры, а также изменяет положение опорного профиля. Положения профиля влияет на конструкцию модели, так, если конструкция теряет жесткость, то появляется дополнительный профиль, который помогает избежать потерю жёсткости:

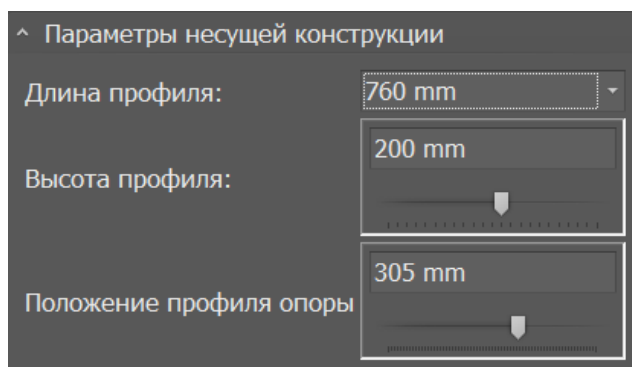


Рисунок 6 – Блок редактирования опорной конструкции

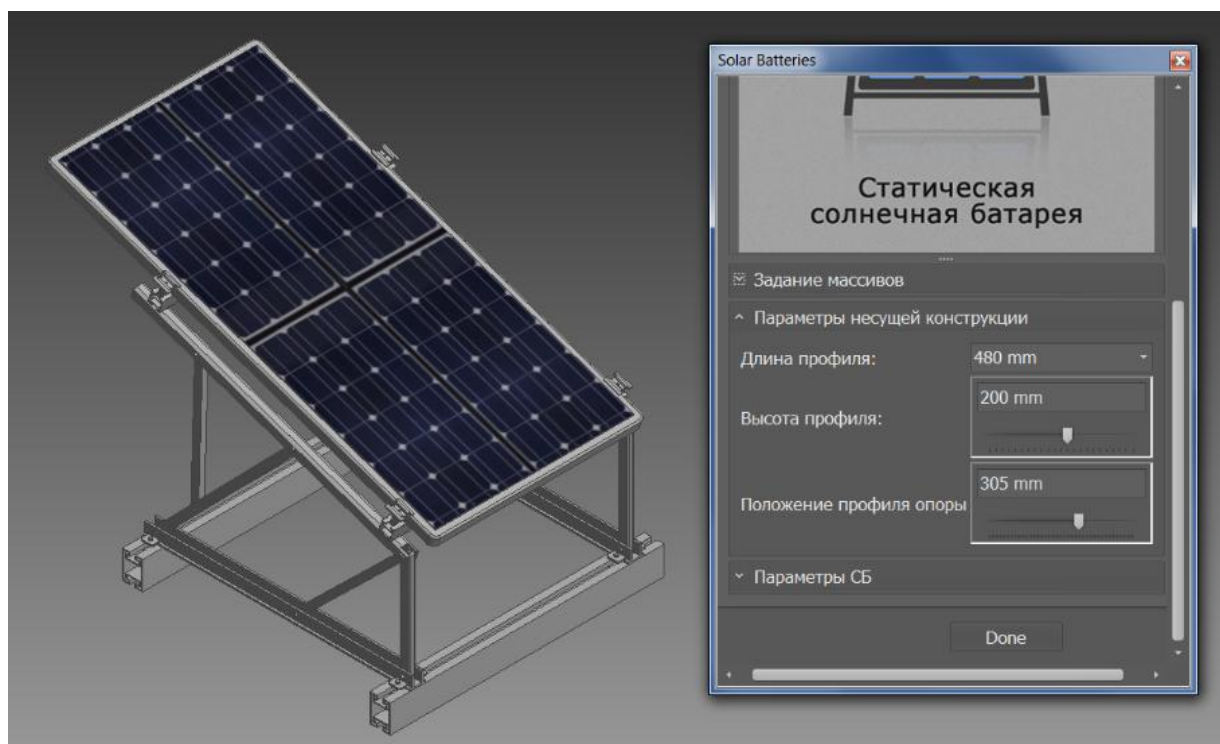


Рисунок 7 – Изменение длины профиля

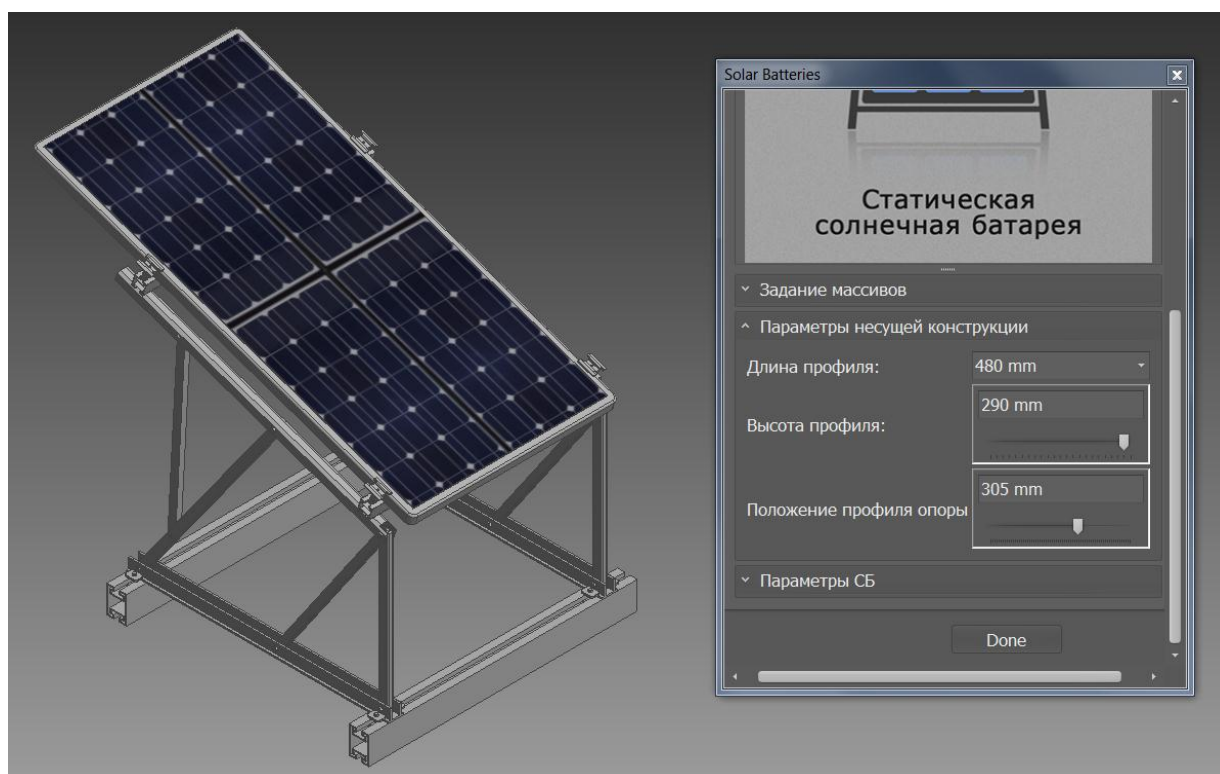


Рисунок 8 – Изменение высоты профиля

Рассмотрим блок изменений параметров солнечной батареи, в нього входять: задание ширины, высоты и угла наклона СБ.

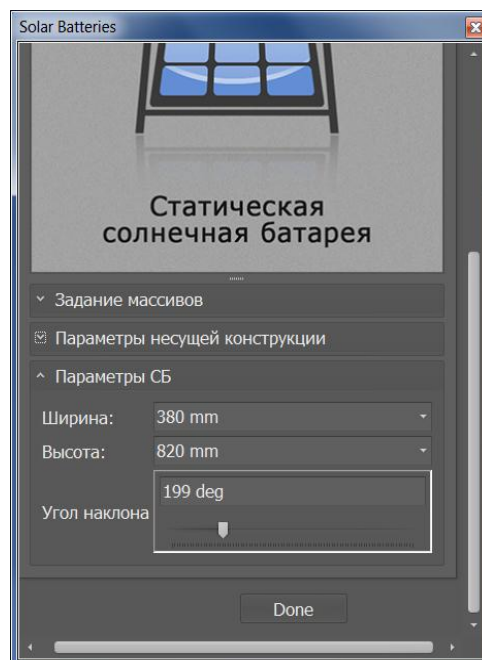


Рисунок 9 – Блок редактирования параметров СБ

Изменение ширины представляет собой ComboBox с данными для СБ по ГОСТ, а также можно изменять угол наклона статичной модели:

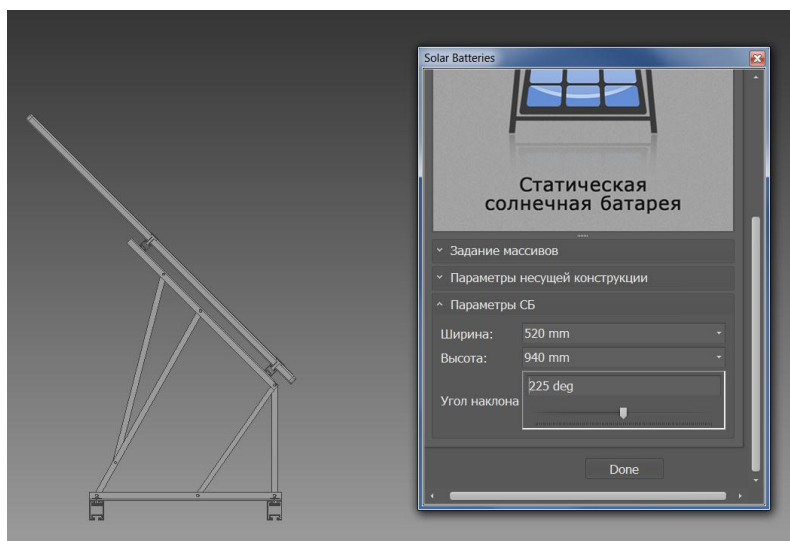


Рисунок 10 – Угол наклона СБ 45 градусов

Блок редактирования одноосевой системы, включает в себя: изменение угла наклона, изменение параметров опоры и рамы крепления.

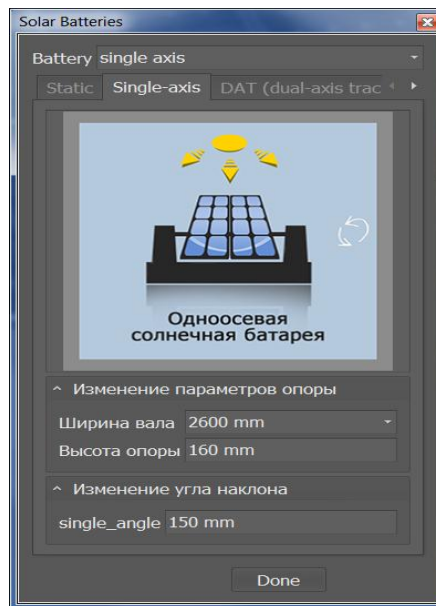


Рисунок 11 – Блок редактирования одноосевой системы СБ

Одноосевые системы – это простейшие из выше представленных типов солнечных батарей. Конструкция таких систем состоит из вала, двигателя, который вращает раму и солнечных батарей. Для этой модели используем три параметра, которые изменяют параметрическую модель. Одним из важнейших параметров – это параметр изменения угла наклона для слежения системы за солнцем.

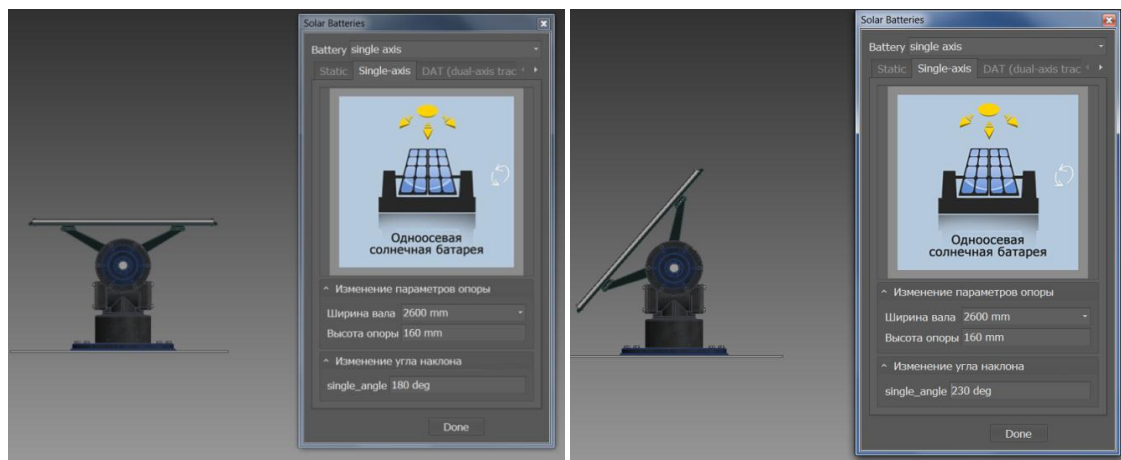


Рисунок 12 – Изменения угла наклона одноосевой системы СБ

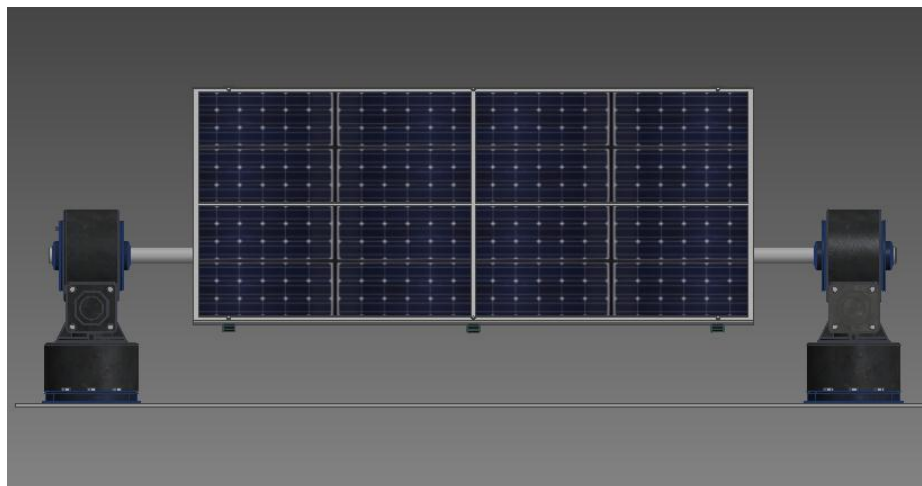


Рисунок 13 – Изменение ширины вала одноосевой системы СБ на 400 мм

Рассмотрим блок подсистемы проектирования двухосевой СБ. Он состоит из четырех основных частей: параметры опоры крепления, параметры опоры, параметры рамы, углы наклона.

Рассмотрим блок с параметрами опоры крепления. Блок включает в параметры редактирования высоты, диаметра основания, количество отверстий для крепления, диаметр отверстий и т.д.

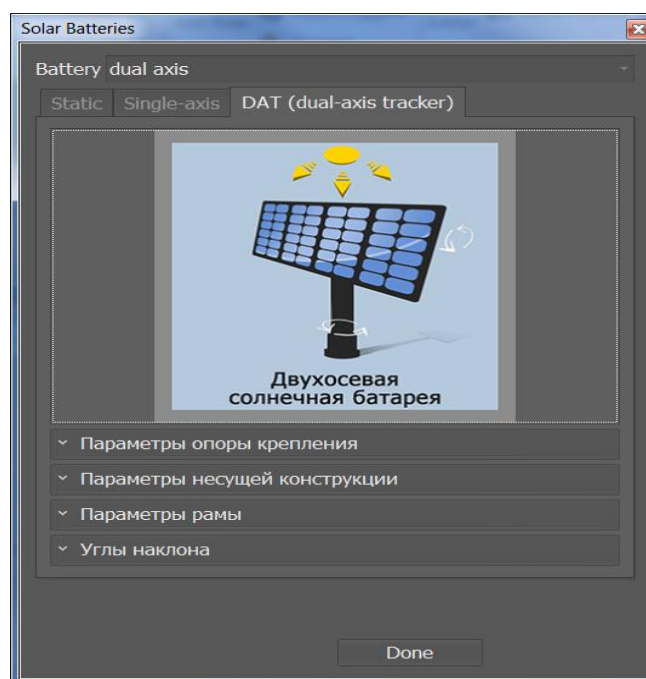


Рисунок 14 – Интерфейс редактирования двухосевой системы

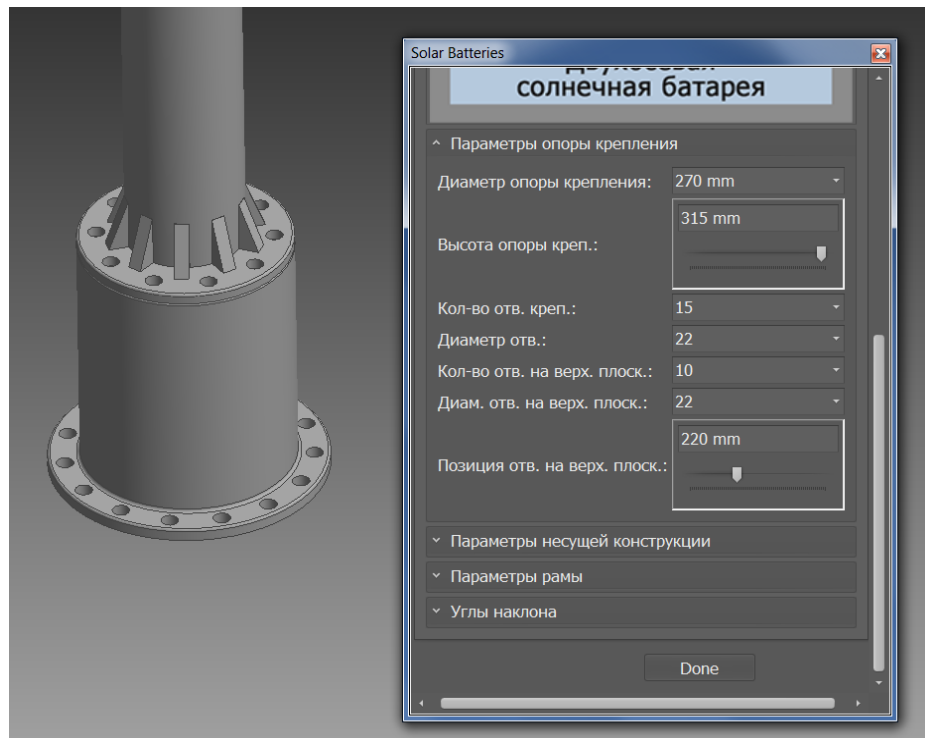


Рисунок 15 – Редактирование параметров опоры крепления

Следующий блок позволяет редактировать параметры основной опоры, на которой закрепляются рама вращения.

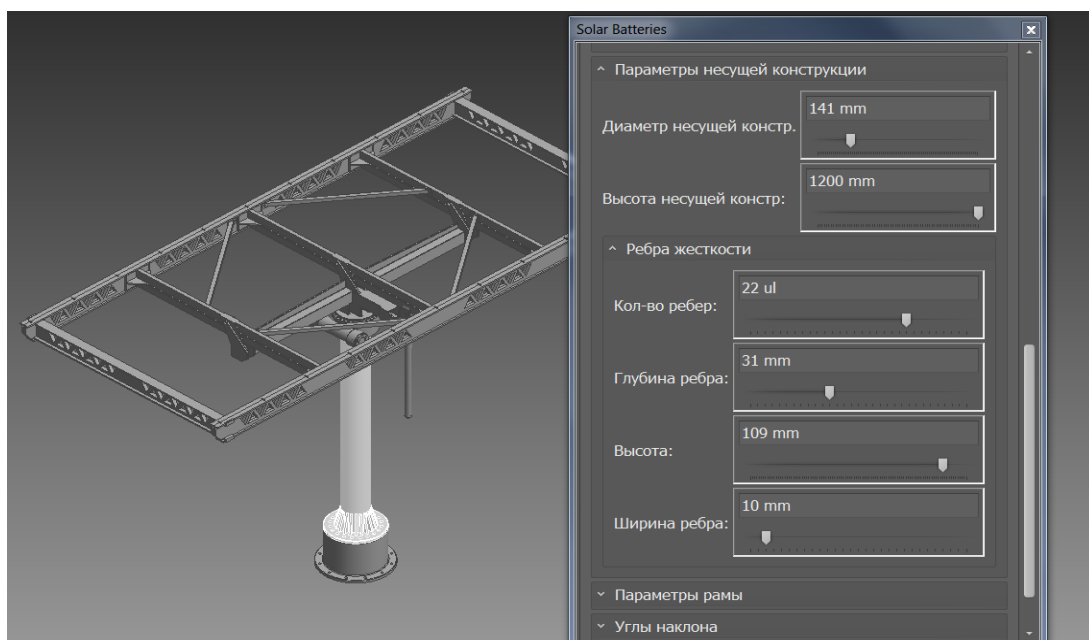


Рисунок 16 – Редактирование параметров основной опоры

Блок редактирования основной опоры включает в себя дополнительные параметры редактирования, так можно редактировать ребра жесткости, увеличивать их количество, высоту, размер в глубину и ширину.

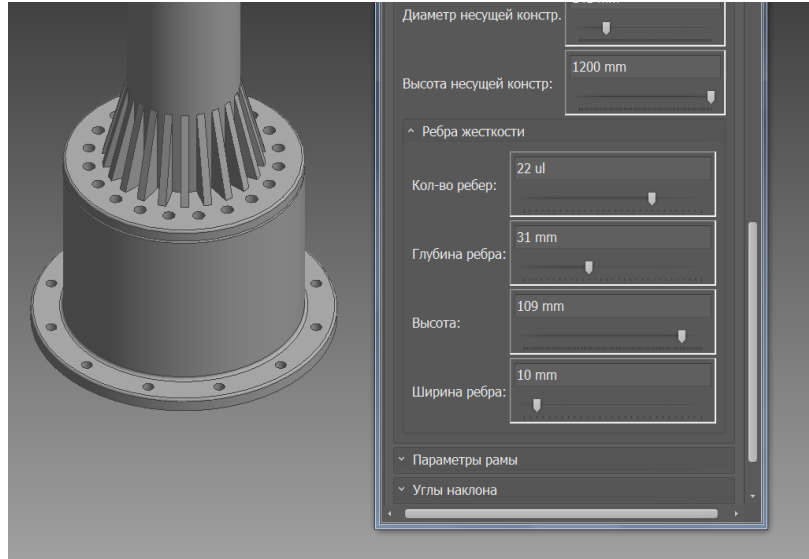


Рисунок 17 – Редактирование параметров ребер жёсткости

Наиболее важный блок, это изменение положения углов поворота двухосевого трекера. Он позволяет оптимально повернуть раму, на которой крепятся солнечные батареи, на необходимый угол.

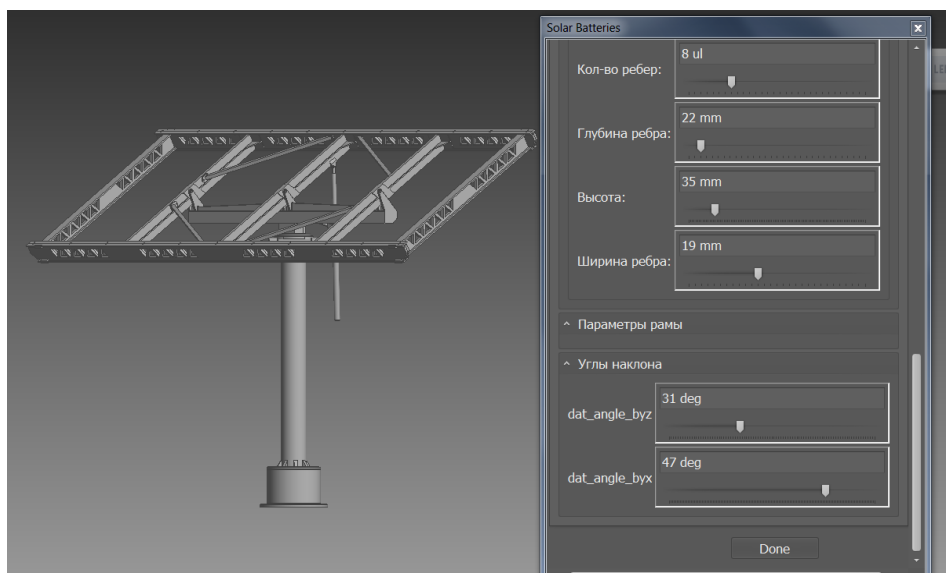


Рисунок 18 – Изменение угла вращения на 47 градусов по горизонтали и угла вращения на 31 градус по вертикали

ВЫВОДЫ:

В статье рассмотрены возможные варианты увеличения КПД солнечных панелей. Подробно были рассмотрены системы ФМ и способы их слежения за солнцем. Было определено, что наиболее эффективным являются активные системы наводки, обеспечивающие наибольший КПД. На основании изучения конструкций солнечных систем, была создана система моделирования и проектирования основных конструкций механизмов слежения за солнцем (трекеров). Развитие работы направлено на совершенствование системы для возможности проведения анализа механических нагрузок и создания системы оптимального управления движения трекерами.

Список использованных источников: 1. *М.В. Китаева, А.В. Охорзина и др. Оптимизация двухосевой системы слежения за солнцем/ Информационно-измерительная техника и технологии: материалы III Научно-практической конференции/—Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 114-124с.* 2. *Hosseini Mousazadeh, Alireza Keyhani and other A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output/ Renewable and Sustainable Energy Reviews v.13 (2009) – pp.1800-1818.* 3. *Deepthi.S, Ponni.A and other Comparison of Efficiencies of Single - Axis Tracking System and Dual - Axis Tracking System with Fixed Mount / International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT) Volume 2, Issue 2, March 2013 – pp.425-430.*

Bibliography (transliterated): 1.M.V. Kitaeva, A.V. Ohorzina i dr. Optimizacija dvuhosevoj sistemy slezhenija za solncem/ Informacionno-izmeritel'naja tehnika i tehnologii: materialy III Nauchno-prakticheskoy konferencii/—Tomsk: Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2012. – 114-124s. 2. Hossein Mousazadeh, Alireza Keyhani and other A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output/ Renewable and Sustainable Energy Reviews v.13 (2009) – pp.1800–1818. 3. Deepthi.S, Ponni.A and other Comparison of Efficiencies of Single - Axis Tracking System and Dual - Axis Tracking System with Fixed Mount / International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT) Volume 2, Issue 2, March 2013 – pp.425 -430.

ЗМІСТ

ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

<i>Внуков Ю.Н., Гермашев А.И., Дядя С.И., Козлова Е.Б., Каморкин П.А.</i> Разработка методики оценки уровня автоколебаний тонкостенной детали при ее концевом фрезеровании.....	3
<i>Внуков Ю.Н., Кучугуров М.В., Зубарев А.Е.</i> Особенности работы привода главного движения токарного станка в режиме постоянного варьирования скоростью вращения шпинделя	14
<i>Гуцаленко Ю.Г.</i> Физический прогноз особенностей вскрытия зеренных металлопокрытий с ультрадисперсными алмазами при алмазно-искровом шлифовании.....	27
<i>Калафатова Л.П., Поколенко Д.В.</i> Определение влияния динамических характеристик процесса шлифования на качество обрабатываемой поверхности изделий из ситаллов	37
<i>Кобелев В.М., Творищук И.М., Оргиян Анд.А.</i> Определение виброустойчивости и жесткости станка при совмещении подрезки с растачиванием.....	47
<i>Пыжов И.Н., Федорович В.А., Клименко В.Г.</i> 3D моделирование процесса правки алмазных кругов методом конечных элементов	54
<i>Тонконогий В.М., Якимов А.А.</i> Расчет амплитуды колебаний при прерывистом шлифовании	63
<i>Якимов А.А.</i> Определение времени теплового насыщения при проектировании абразивного инструмента с прерывистой рабочей поверхностью.....	71
<i>Яровой Ю.В., Яровая И.А.</i> Распределение припуска по условию минимума удельной работы резания.....	80

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

<i>Внуков Ю.Н., Козлова Е.Б., Кондратюк Э.Б.</i> О влиянии PVD покрытий на условия резания, износ и стойкость инструмента	86
---	----

Внуков Ю.Н., Козлова Е.Б., Кондратюк Э.Б. Конструирование многослойных покрытий для резания железоуглеродистых материалов инструментом из быстрорежущей стали.....	114
Онисько О.Р., Богаченко О.М., Роп'як Л.Я. Технологічні аспекти армування тіл обертання гранулами легких карбідів у процесі електрошлакового відцентрового лиття	128
Становский А.Л., Торопенко А.В., Швец П.С., Бондаренко В.В. Автоматизированное проектирование тепломассообменных аппаратов с помощью фрактальных сверток компьютерных томограмм.....	140
Федорович В.А., Пыжов И.Н. 3D моделирование процесса изготовления алмазных кругов методом конечных элементов.....	156
Филатов Ю.Д., Сидорко В.И., Филатов А.Ю., Ковалев С.В., Ветров А.Г., Сильченко Я.Л., Данильченко М.А. Полирование монокристаллических материалов для оптоэлектронной техники.....	168
Шелковой А.Н., Шрон Л.Б., Ищенко Г.И., Рузметов А.Р., Семченко М.С. К вопросу о имитационном моделировании машинно-ручных технологических операций в системах обработки металлов резанием.....	177

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ

Вайсман В.О., Колесникова Е.В., Олех Т.М., Оборская А.Г. Построение системы менеджмента качества на основе международных стандартов	192
Залога В.О., Івченко О.В., Залога О.О. Система факторів, що впливають на якість інструментальної підготовки машинобудівного підприємства в умовах закупівлі металорізального інструменту	201
Криворучко Д.В., Осадчий И.О. Качество зубчатых колес на основе волокнистых полимерных композиционных материалов.....	214
Лищенко Н.В., Ларшин В.П., Сабиров Ф.С. Спектральный анализ при измерении параметров шероховатости и волнистости фрезерованной поверхности	222

Оргиян А.А., Баланюк А.В., Албакуш Аимен Расчеты погрешностей тонкого растачивания гладких и ступенчатых отверстий	235
Равська Н.С., Охріменко О.А. Визначення відхилення профілю зубчастих коліс від евольвентного при їх зубофрезеруванні черв'ячними фрезами	249
Тонконогий В.М., Прокопович И.В., Духанина М.А., Шмараев А.В. Повышение качества машиностроительных литых деталей	259
Усов А.В., Смирный С.Г. Исследование причин трещинообразования при шлифовании материалов и сплавов, склонных к этому виду дефектов	267
Якимов О.О., Бовнегра Л.В., Корнещук І.Т. Розрахунок глибини дефектного шару, що утворюється при зубошліфуванні тарільчастими кругами	283

ЕКОНОМІКА ТА ЕКОЛОГІЯ

Гусарев В.С., Кадхим А.Б. Энергетические затраты на производство изделий машиностроения	295
Поперека К.Д., Костенко В.Л. Розробка програмного забезпечення автоматизованого контролю комплексного показника санітарно-гігієнічних факторів	306
Становская И.И., Щедров И.Н., Березовская Е.И., Добровольская В.В. Управление латентными рисками в технологии машиностроения	314
Тигарев В.М., Тонконогий В.М., Сапожков Е.И. Создание системы моделирования и проектирования солнечных батарей в САПР Inventor	324

Науково-виробниче видання

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ

Збірник наукових праць
Українською, російською та англійською мовами

Випуск 10

Відповідальний за випуск: проф. *В. О. Федорович*

Матеріали відтворено з авторських оригіналів

Підп. до друку 21.08.2015 р. Формат 70×100 1/16. Папір офісний.

RISO-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 20,0.

Наклад 300 прим. Зам. № _____

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21
