

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 12

ХАРКІВ НТУ «ХПІ» – 2017 – KHARKIV NTU «KhPI»

УДК 621.91
ББК 34.63
С 56

Державне видання
Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 13438-2322Р від 03.08.2007 р.
Друкується за рішенням Вченої Ради НТУ «ХП»
(протокол № 6 від 07.07.2017 р.)

*Редакційна
колегія:*

В. О. Федорович (відповідальний редактор),
В. Л. Доброскок (зам. відповідального редактора),
Н.В. Крюкова (відповідальний секретар),
І. М. Пижов, Ю. М. Внуков, А. І. Грабченко,
Б. Карпушевський, Я. Кундрак, А.Г. Мамаліс,
А. Машарський, П. П. Мельничук,
Раджаб Заде Мортеза, Ю. А. Сізій,
Р. С. Турманідзе, В. А. Фадєєв, М. Д. Узунян

*Адреса
редакційної
колегії:*

61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
кафедра «Інтегровані технології
машинобудування» ім. М. Ф. Семка,
тел.: +38 (057) 706-41-43.

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

С56 Сучасні технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. –
Вип. 12 / редкол.: В. О. Федорович (голова) та ін. – Харків :
НТУ «ХП», 2017. – 156 с. – Укр., рос., англ. мовами.

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

Для науковців, викладачів вищих навчальних закладів, промисловців.

УДК 621.91
ББК 34.63

© Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», 2017

УДК 621.941

Е.И. СОКОЛ, д-р техн. наук,
С.С. ДОБРОТВОРСКИЙ, д-р техн. наук,
А.А. ПЕРМЯКОВ, д-р техн. наук,
С.С. ГНУЧИХ, Харьков, Украина

JAVAMACH CLUSTER – ЕДИНАЯ ПЛАТФОРМА ОБАЗОВАНИЯ, НАУКИ И ПРОИЗВОДСТВА

Современное ускорение научно-технического прогресса основано на использовании кластерного подхода. На сегодня нет единого подхода к формированию модели кластеров. В основном популярны объединения на промышленной основе и близком географическом положении [1, 2]. Как правило, кластеры создаются для быстрого решения конкретной проблемы или задачи. Недостатком такого подхода является то, что с исчезновением проблемы, как правило, исчезает и кластер. Возникает проблема преемственности в развитии. На наш взгляд создание кластера, способного решать глобальные задачи и иметь постоянное развитие должно иметь под собой некую единую идеологическую платформу, которую признают все участники кластера и используют ее в теоретической и практической деятельности. В данной работе в качестве такой идеологической платформы для создания кластера информационных технологий в НТУ «ХПИ» предлагается использовать язык программирования Java и остальные преимущества Java платформы. Подход к созданию такого кластера рассматривается на примере машиностроительного направления.

JavaMach Cluster (джавамаш кластер) – это кластер, объединяющий на добровольной основе организации и людей на одном единственном принципе: использование языка программирования Java для решения задач машиностроения. JavaMach Cluster – добровольное объединение кафедр и предприятий машиностроения на основе Java платформы.

Цель создания JavaMach Cluster – создание единой учебной, научной, практической платформы и ядра машиностроения на основе использования языка программирования Java и Web технологий.

Инициатива создания JavaMach Cluster принадлежит кафедре Технологии машиностроения и металлорежущих станков НТУ «ХПИ». Актуальность создания кластера обусловлена несколькими причинами. Первая обусловлена необходимостью интерактивного представления кафедры в интернет-пространстве, т.е. создание виртуальной интернет-кафедры. Вторая – это попытка объединить усилия машиностроительных кафедр Украины для совершенствования подготовки специалистов на стыке информационных и машиностроительных технологий на единой Java платформе. И третья, на наш взгляд самая главная, перейти от пути потребителей программ на путь их создания. На сегодняшний день решение такого класса задач возможно только на

основе использования языка программирования Java, Java приложений и других приложений совместимых с Java-технологиями. Почему именно Java платформа? Это объектно-ориентированный подход к программированию, интернет и WEB направленность. Его универсальность применения при создании программ для промышленности, интернета, мобильной связи и бытовой техники с использованием JVM не нужно доказывать. Доля Java программ на рынке занимает порядка 60% от общего числа программ.

Основные учебные задачи кластера.

Сквозной цикл подготовки студентов с 1 го по 6 курс на единой платформе.

Командная работа.

Качественная подготовка студентов.

Привлекательность для абитуриентов.

Ускорение адаптации к европейским стандартам и практическое усвоение английского языка.

Свободный обмен учебными материалами и программами между кафедрами вузов.

Основные общие задачи кластера.

Единая платформа общения между участниками кластера.

Адаптация машиностроения к европейским стандартам.

Участие в Европейских проектах.

Создание единого технологического ядра для Украинских предприятий

Интеграция JavaMach-ядра с CAD/CAM/CAE/CAPP/PDM/ERP системами.

Главная цель – создание в перспективе отечественной системы уровня ERP.

На кафедре на примере решения задачи «Оптимизация выбора заготовок из проката для обрабатывающих центров» подробно реализуются подходы решения серверной части проекта, формирования баз данных и особенности WEB решений в работах бакалавров и магистров.

Инициативу создания JavaMach Cluster поддержали все кафедры машиностроительного факультета НТУ «ХПИ» и участники конференции «MicroCAD 2017».

В заключение необходимо отметить перспективность распространения такого кластерного подхода в рамках всего института с приглашением в «Java Cluster KhPI» заинтересованные вузы, предприятия, фирмы.

Список использованных источников: 1. *Porter M.* Международная конкуренция – М.: Междунар. отношения, 1993. – 896 с. 2. *Porter M.* Конкуренция – М.: «Вильямс», 2001. – 495 с. 3. *Herbert Schildt* The Complete Reference. Ninth Edition. Fully updated for Java SE 8 (JDK 8) –Oracle Press, 2014. -1243 p.

Bibliography (transliterated): 1. *Porter M.* Mezhdunarodnaja konkurencija – М.: Mezhdunar. otnoshenija, 1993. – 896 s. 2. *Porter M.* Konkurencija – М.: «Vil'jams», 2001. – 495 s. 3. *Herbert Schildt* The Complete Reference. Ninth Edition. Fully updated for Java SE 8 (JDK 8) –Oracle Press, 2014. -1243 p.

ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

УДК 621.914.1

С.И. ДЯДЯ, канд. техн. наук, Запорожье, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТОНКОСТЕННОГО ЭЛЕМЕНТА ДЕТАЛИ ПРИ КОНЦЕВОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ С АВТОКОЛЕБАНИЯМИ

У статті розглянуто причини виникнення хвиль на обробленій поверхні тонкостінного елемента деталі після зустрічного кінцевого циліндричного фрезерування з автоколиваннями.

Ключові слова: кінцево циліндричне фрезерування, автоколивання

В статье рассмотрены причины образования волн на обработанной поверхности тонкостенного элемента детали после встречного концевое цилиндрическое фрезерование с автоколебаниями

Ключевые слова: концевое цилиндрическое фрезерование, автоколебания

This article presents reasons of the wave's formation on the machined surface of thin-wall parts after counter cylindrical milling with chatter.

Keywords: counter cylindrical milling, chatter

Проектирование деталей с целью их использования в заданных условиях эксплуатации, кроме выбора материала предусматривает и определение как геометрических размеров и формы ее поверхностей, так необходимых параметров их качества (физико-химико-механическое состояния, точность, шероховатость и т.п.), в зависимости от которых проектируется технологический процесс изготовления изделия. В настоящее время еще достаточно часто применяют лезвийную обработку, при которой точность размера, формы, шероховатость поверхности, стойкость инструмента и производительность в значительной мере определяются как кинематическими параметрами процесса обработки, так и характером взаимодействия обрабатываемой детали с инструментом. Например, наличие упругих отжатый из-за недостаточной жесткости элементов обрабатывающей системы (детали, инструмента, приспособления и т.п.), колебаний, как вынужденных, так и автоколебаний, могут привести к образованию волнистости на обработанной поверхности. Это может в определяющей мере влиять на работоспособность самой детали, узла, в котором она стоит, или изделия в целом. На рис. 1,а показана поверхность на обработанной детали (рабочего колеса компрессора), получаемая после фрезерования ее тонкостенных элементов (лопаток), ее профилограмма (рис. 1,б) и параметры образующейся при этом волны – шаг S_{wi} и высота W_{zi} .

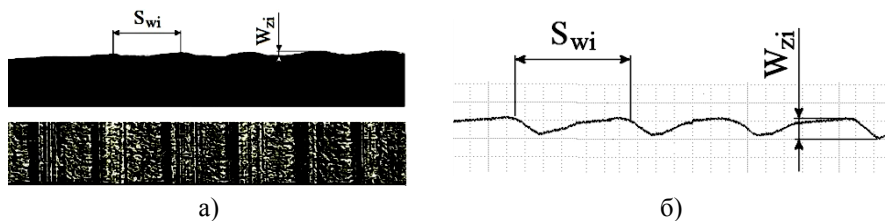


Рисунок 1 – Волнистая поверхность детали после встречного концевое цилиндрического фрезерования:
а) обработанная поверхность; б) профилограмма

В работах отечественных и иностранных исследователей [1-13] установлено, что деталь при резании, в том числе и при фрезеровании (как при встречном, так и при попутном) имеет место самонастраиваемый (самоорганизующийся) колебательный процесс с определенным периодом автоколебаний (T_{AK}), периодом свободных колебаний детали ($T_{СКД}$) и размахом колебаний (R_i) (рис. 2).

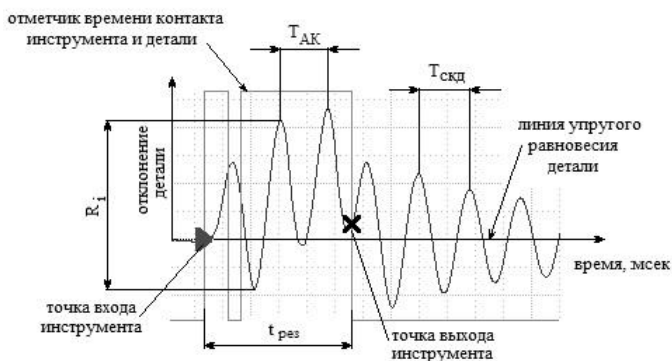


Рисунок 2 – Фрагмент осциллограммы автоколебаний детали при концевом цилиндрическом встречном фрезеровании [15]

Характерной особенностью встречного фрезерования является то, что резание начинается с минимальной толщины срезаемого слоя практически необладающего демпфированием. Поэтому автоколебания возникают сразу после врезания инструмента в деталь. В настоящее время еще недостаточно изученным является вопрос о том, каким образом колебания, возникающие при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных элементов детали, характеризуемые, в том числе, и относительно невысокой жесткостью режущего инструмента (концевые фрезы небольшого диаметра ($\varnothing 6-10$ мм) и относительно большой длины режущей части (60-80 мм)), влияют на механизм формирования обработанной поверхности.

Целью данной статьи является изучение на основе экспериментальных исследований динамического состояния (автоколебаний) маложестких элементов обрабатывающей системы механизма формирования поверхности при встречном концевом цилиндрическом фрезеровании.

Исследования проводились на специальном стенде, позволяющем создавать различные характеристики упругой системы [14], и по специально созданной методике [15], которая позволяет с использованием современной регистрирующей техники записывать осциллограммы колебаний элементов системы (детали и инструмента), характеризующих законы их движений, собирать и обрабатывать данные о процессе резания.

Кроме этого экспериментально установлено, что независимо от свойств обрабатываемого материала всегда есть третья скоростная зона [16], в которой действуют автоколебания, существенно влияющие на стойкость инструмента и качество обработанной поверхности. Как правило, эта зона охватывает режимы резания черновой и получистовой обработки материалов, применяемых, в частности, в авиакосмической промышленности. Динамические свойства тонкостенного элемента детали создавались путем закрепления упругого элемента с обрабатываемым материалом на необходимый вылет. При этом для исключения существенного влияния концевой фрезы на колебания при резании ее конструкция имеет жесткость в три раза больше, чем упругого элемента. Обрабатываемый материал специально выбран с такими свойствами, чтобы не влиять на стойкость инструмента при проведении экспериментов. Для обеспечения резания в третьей скоростной зоне были выбраны следующие условия.

1. Оборудование - вертикально-фрезерный станок FWD-32J.
2. Инструмент – специальная однозубая, прямозубая фреза $\varnothing 55$ мм с регулируемым положением зуба [20]. Материал режущей части BK8; частота свободных колебаний 833 Гц.
3. Обрабатываемый материал – Сталь 3кп.
4. Упругий элемент – вылет 80мм, толщина 6мм, частота свободных колебаний 390 Гц.
5. Режимы резания: частота вращения шпинделя, $n_{шп} = 280$ об/мин; подача на зуб, $S_z = 0,1$ мм; осевая глубина, $a_p = 3,4$ мм; радиальная глубина, $a_e = 0,5$ мм; направление подачи – встречное; резание свободное.

Для изучения процесса образования обработанной поверхности необходимо иметь представление о поверхности резания. Поэтому для ее получения стол с деталью в процессе фрезерования перемещали вертикально вниз, выводя инструмент из детали.

Сравнение поверхности резания с осциллограммой указывает на идентичность их формы (рис. 3).

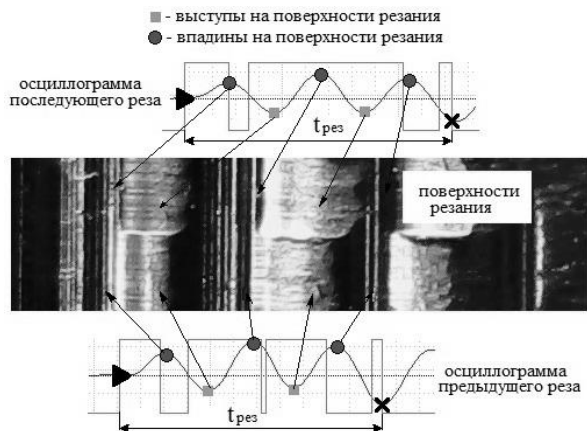


Рисунок 3 – Поверхности резания и соответствующие им осциллограммы

Так как поверхность резания образуется при совместном контактном движении инструмента и детали во время резания, а на осциллограмме записывается это движение, то по ней можно судить о форме поверхности резания. Это важно для того, чтобы можно было изучать изменение на поверхности резания при формообразовании. Изучая форму осциллограмм, было отмечено периодическое изменение размаха колебаний (R_i) всех волн, но сильнее это отражается на первой волне, изменяющей в большей степени эту величину от наибольшего (R_{1max}) до наименьшего значения (R_{1min}), что наглядно видно при наложении последовательных осциллограмм колебаний детали при резании (рис. 4, а), а также периодичность таких изменений (рис. 4, б).

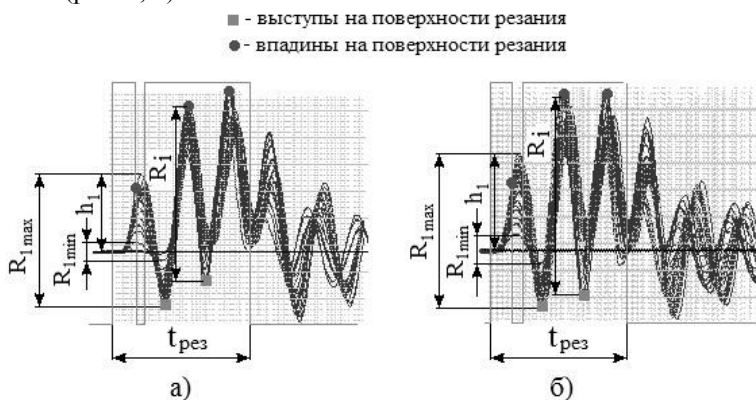


Рисунок 4 – Периодичность изменения размаха волн автоколебаний
а) осциллограммы первого периода; б) осциллограммы второго периода

Кроме того следует обратить внимание и на отклонение первой волны автоколебаний от линии упругого равновесия h_1 , которое также меняет свое значение от наибольшего до наименьшего. Это отклонение участвует в образовании впадины на поверхности резания.

В табл. 1 записаны величины отклонения первой волны автоколебаний от линии упругого равновесия h_1 (рис. 4, а), измеренные по осциллограммам, охватывающих несколько повторяющихся циклов.

Таблица 1 – Отклонение от линии упругого равновесия первой волны автоколебаний, мм

Номер реза	Номер периода повторения цикла					
	1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6	7
1	0,108	0,088	0,110	0,102	0,105	0,112
2	0,105	0,085	0,098	0,101	0,100	0,109
3	0,100	0,085	0,092	0,097	0,100	0,095
4	0,094	0,076	0,088	0,093	0,089	0,091
5	0,091	0,075	0,084	0,089	0,085	0,090
6	0,091	0,074	0,083	0,087	0,076	0,089
7	0,090	0,073	0,080	0,085	0,079	0,085
8	0,090	0,069	0,075	0,083	0,092	0,084
9	0,089	0,065	0,071	0,083	0,093	0,085
10	0,086	0,062	0,069	0,083	0,088	0,081
11	0,085	0,061	0,066	0,080	0,077	0,080
12	0,085	0,058	0,065	0,078	0,077	0,080
13	0,082	0,058	0,061	0,075	0,060	0,076
14	0,077	0,057	0,056	0,073	0,063	0,077
15	0,076	0,058	0,054	0,071	0,063	0,076
16	0,066	0,052	0,053	0,071	0,059	0,075
17	0,061	0,050	0,050	0,070	0,048	0,074
18	0,049	0,038	0,050	0,062	0,048	0,052
19	0,039	0,023	0,047	0,059	0,043	0,051

Продолжение табл. 1

20	0,032	0,023	0,037	0,055	0,040	0,051
21	0,013	0,012	0,027	0,052	0,029	0,050
22	0,002	0,004	0,025	0,032	0,027	0,046
23			0,017	0,030	0,013	0,036
24			0,006	0,020	0,004	0,029
25				0,007		0,017
26						0,015
27						0,008

По результатам измерения построены графики изменения отклонения первой волны осциллограммы от линии упругого равновесия на каждом последующем резе, составляющих период (рис. 5).

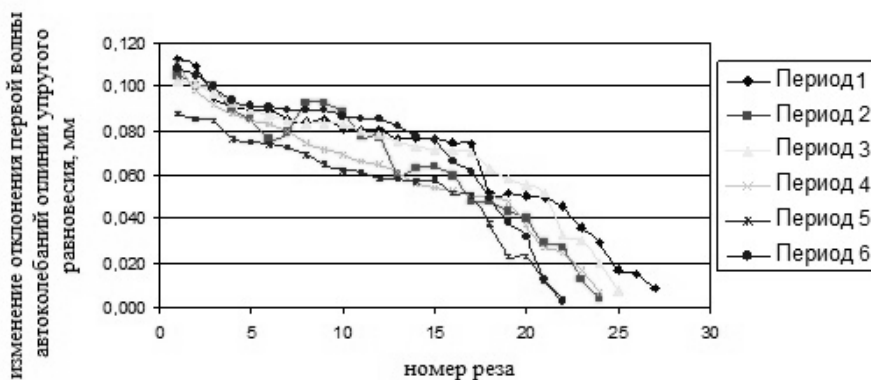


Рисунок 5 – Изменение отклонения первой волны автоколебаний от линии упругого равновесия

Для проверки того, что лунка от первой волны автоколебаний является формообразующей обработанной поверхностью, после фрезерования была записана профилограмма (рис. 6). Графики, построенные на рис. 5, и профиль обработанной поверхности (рис. 6) идентичны как по внешнему виду, так и по размерам высот и длин волн.



Рисунок 6 – Профилограмма поверхности после встречного фрезерования

Поэтому можно сказать, что формообразующая лунка при встречном фрезеровании остается от первой волны автоколебаний. Ее переменная глубина определяет высоту волны на обработанной поверхности, а ее шаг зависит от количества резов в пределах повторяющихся периодов и величины подачи.

Для подтверждения того, что лунка от первой волны определяет форму обработанной поверхности, были проведены ее исследования после обработки на разных частотах вращения шпинделя, входящих в третью скоростную зону колебаний.

В табл. 2 приведены наложенные осциллограммы и профилограммы, полученные при фрезеровании с разными частотами вращения шпинделя и одинаковыми другими условиями, охватывающие один период изменения первой волны, и ее параметры, взаимосвязанные с обработанной поверхностью.

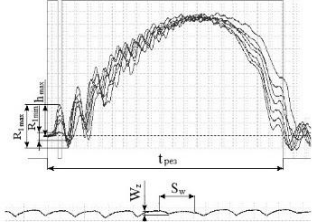
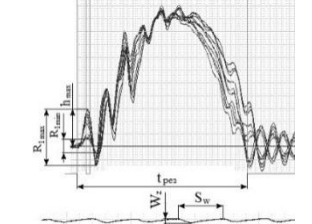
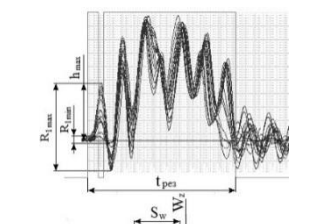
Лунки, оставляемые инструментом на обработанной поверхности при встречном фрезеровании, располагаются с шагом, равным подаче на зуб. При повторяющихся циклах изменения глубины лунки от наибольшего значения до наименьшего шаг волны можно определить как произведение количества резов за период ($n_{рез}$) на подачу на зуб (S_z).

$$S_w = n_{рез} \cdot S_z \quad (1)$$

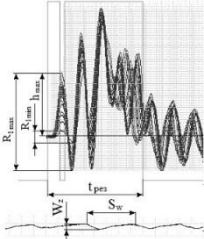
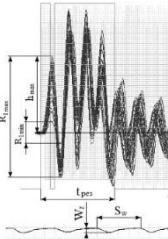
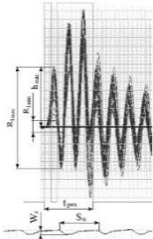
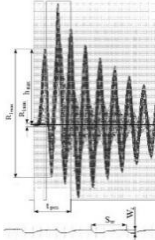
Данные табл. 2 согласовываются с приведенными выше результатами шага волны и ее высоты и подтверждают, что шаг волны на обработанной поверхности формируется именно лунками первой волны автоколебаний, имеющих разную глубину.

Разные значения высоты волны на обработанной поверхности и наибольшего отклонения первой волны автоколебаний от линии упругого равновесия, приведенные в табл. 2, связаны с тем, что деталь и фреза имеют разные жесткости. Поэтому их упругие отжатия при автоколебаниях будут неодинаковые: у фрезы – меньшие, у детали – большие.

Таблиця 2 – Наложенные осциллограммы колебаний детали при разных частотах вращения шпинделя

Частота вращения шпинделя об/мин	Наложение осциллограмм, профилограмма	Наибольшее отклонение от линии упругого равновесия, h_{\max} , мм	Количество резцов, $n_{\text{рез}}$	Шаг волны на профилограмме, S_w , мм	Высота волны на профилограмме, W_z , мм
1	2	3	4	5	6
112		0,052	7	0,65	0,044
140		0,073	10	0,93	0,060
180		0,081	14	1,35	0,074

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6
224		0,091	18	1,88	0,088
280		0,142	28	2,76	0,104
355		0,153	30	3,05	0,143
450		0,220	41	4,09	0,172

На рис. 7 показан фрагмент осциллограммы колебаний инструмента и детали, на котором видно, что существует разрыв контакта между инструментом и деталью в тот момент, когда фреза, достигнув крайней точки упругой деформации, возвращается назад, а деталь еще продолжает движение до своей точки наибольшего отжатия. В момент разрыва контакта и вырезается формообразующая лунка. Поэтому значения высоты волны на обработанной поверхности (W_z) и наибольшего отклонения первой волны от линии упругого равновесия (h_{\max}) имеют разные величины.

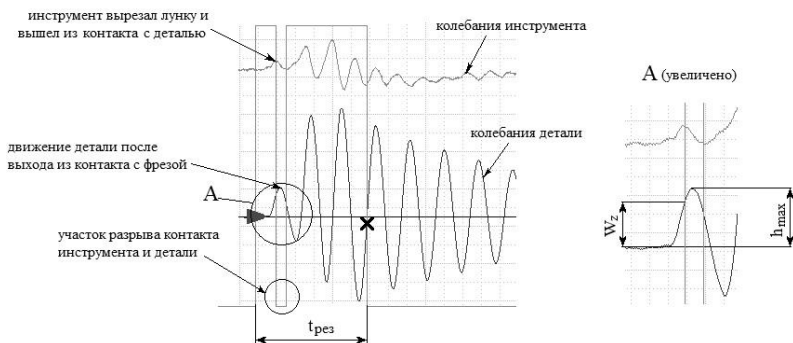


Рисунок 7 – Влияние разной жесткости инструмента и детали на их упругие отжатия при колебаниях

Коэффициент корреляции между частотой вращения шпинделя и высотой волн на обработанной поверхности равен 0,99. На рис. 8 показан график зависимости между ними.

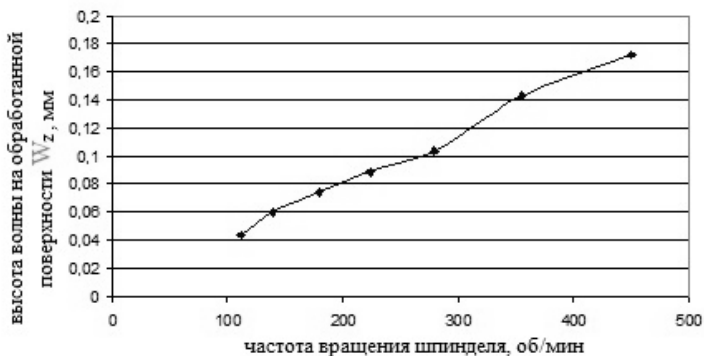


Рисунок 8 – Зависимость между частотой вращения шпинделя и высотой волн на обработанной поверхности после встречного концевое цилиндрического фрезерования

Уравнение регрессии имеет вид:

$$W_z = 0,0004 \cdot n_{\text{шп}} + 0,0045 \quad (2)$$

Из данных, приведенных в табл. 2, следует, что с увеличением частоты вращения шпинделя увеличивается и шаг волны на обработанной поверхности.

Причину периодичности повторения волн на обработанной поверхности следует искать на поверхности резания, которая от автоколебаний имеет волнистую форму. При движении подачи происходит периодическое срезание на ней выступов волн и прохождение впадин, что определяет толщину сечения срезаемого слоя. Наибольшая лунка образуется, когда толщина сечения минимальная, что соответствует прохождению резцом впадины. При срезании выступа волны толщина сечения срезаемого слоя постепенно увеличивается, что приводит к снижению амплитуды автоколебаний и уменьшению глубины вырезаемой лунки. В зависимости от частоты вращения шпинделя основание волны имеет разную ширину, т.е. количество резцов, которое необходимо для его срезания, разное. Длина участка на поверхности резания, определяющая шаг волн на обработанной поверхности, по осциллограмме определяется временем (t) от начала резания и до впадины второй волны (рис. 9).

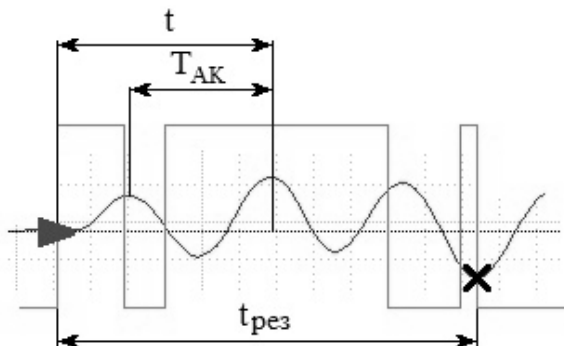


Рисунок 9 – Участок на осциллограмме, отражающий формирование шага волны на обработанной поверхности

В табл. 3 и 4 приведены характеристики автоколебаний и средние шаги волн на обработанной поверхности (соответственно) при фрезеровании с различными частотами вращения шпинделя.

Таблица 3 – Характеристики автоколебаний при разных частотах вращения шпинделя

Частота вращения шпинделя $n_{шп.}$, об/мин	Период автоколебаний T_{AK} / частота f , мсек/Гц	Наибольший размах первой волны автоколебаний R_{1max} , мм	Время t /длина участка l , определяющего шаг волны, мсек/мм
112	1,8/555	0,053	1,92/0,61
140	1,8/555	0,074	2,20/0,88
180	1,86/537	0,113	2,52/1,30
224	1,86/537	0,147	2,64/1,70
280	1,98/505	0,174	3,00/2,42
355	1,98/505	0,257	2,94/3,00
450	1,98/505	0,313	2,88/3,73

Таблица 4 – Средние шаги волн на обработанной поверхности при фрезеровании с различными частотами вращения шпинделя.

Частота вращения шпинделя $n_{шп.}$, об/мин	Средний шаг волны на обработанной поверхности $S_{всп}$, мм
112	0,57
140	0,84
180	1,27
224	1,69
280	2,24
355	2,92
450	3,82

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что наибольшая погрешность между измеренным шагом и рассчитанным по осциллограмме равна 8%. Коэффициент корреляции между частотой вращения шпинделя и шагом волны на обработанной поверхности равен 0,99.

Уравнение регрессии имеет вид:

$$S_w = 0,0096 \cdot n_{\text{шп}} - 0,481 \quad (4)$$

На рис. 10 показан график зависимости между частотой вращения шпинделя и шагом волн на обработанной поверхности.

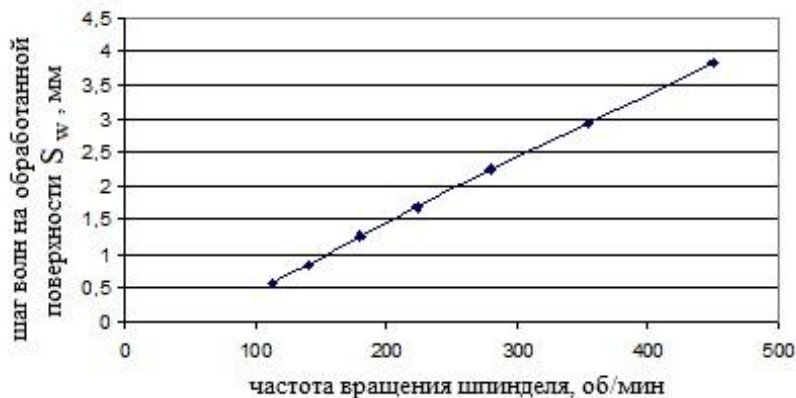


Рисунок 10 – Зависимость между частотой вращения шпинделя и шагом волн на обработанной поверхности

Выводы

На основании проведенных исследований установлены основные принципы оценки качественных показателей обработанной поверхности (на примере образования при резании волнистой поверхности) в зависимости от динамического состояния обрабатывающей системы при наличии в ней маложестких элементов.

1. При встречном концевом цилиндрическом фрезеровании волнистый профиль обработанной поверхности обусловлен волнистой формой поверхности резания.

2. Поверхность, обработанная при встречном концевом цилиндрическом фрезеровании с автоколебаниями, формируется резами инструмента, оставляемыми на детали первой волной автоколебаний.

3. Изменение толщины сечения срезаемого слоя при прохождении волнистой поверхности резания и тем самым изменение глубины лунки, вырезаемой инструментом на обработанной поверхности, обуславливается движением подачи.

4. Шаг волн на обработанной поверхности определяется количеством резцов, необходимых для срезания выступа первой волны автоколебаний, и величиной подачи на зуб

Список использованных источников: 1. Амосов И.С. Точность, вибрации и чистота поверхности при токарной обработке / И.С. Амосов, В.А. Скраган – Москва- Ленинград: Mashgiz, 1958. – 92с. 2. Каширин А. И. Исследование вибраций при резании металлов. /А.И. Каширин. – Москва-Ленинград: изд-во академии наук СССР. 1944. – 144 с. 3. Крепак А. С. Исследование процесса резания жаропрочных сталей концевыми фрезами с разнонаклонными зубьями: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.171 «Теория обработки резанием» / А. С. Крепак – Тула, 1972. – 23 с. 4. 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. 5. Свинин В. М. Управление регенеративными автоколебаниями при фрезеровании на основе модуляции скорости резания: Дис. д-ра техн. наук: 05.03.01 / Свинин Валерий Михайлович. – Иркутск, 2008. – 342 с. 6. Tobias S. A. Theory of Regenerative Machine Tool Chatter / S. A. Tobias, W. Fiswick. – London: Engineering, 1958. – 258 7. Tlustý J. The Stability of Machine Tools Against Self-Excited Vibrations in Machining. / J. Tlustý, M. Polacek // ASME International Research in Production Engineering. – 1963. – P. 465-474. 8. Olgac N. Dynamic and stability of variable pitch milling / N. Olgac R. Sipahi // Journal of Vibration and Control, 2007. – № 13(7). – P. 1031–1043. 9. Budak E. Analytical Prediction of Chatter Stability Conditions for Multi-Degree of Systems in Milling. Part I: Modeling / E. Budak, Y. Altintas // Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. – 1998. – Vol. 120. – P. 22–30. 10. Budak E. An Analytical Design Method for Milling Cutters With Nonconstant Pitch to Increase Stability, Part 2: Application / E. Budak // ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2003. – Vol. 125. – P. 35–38. 11. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechines, Machine Tool Vibrations, and CNC Design / Y. Altintas. – 2013 – 365 p. 12. Altintas Y. Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling / Y. Altintas, E. Budak // Annals of the CIRP. – 1995. – Vol. 44. – P. 357–362. 13. Altintas Y. Analytical Prediction of Chatter Stability and Design for Variable Pitch Cutters/ Y. Altintas, S. Engin, E. Budak // Trans. ASME, Manufacturing and Engineering and Science. – 1999. – Vol. 121 – P. 173–178. 14. Патент UA 94974 МПК (2006) G01H11/00; G01M7/02. Стенд для дослідження коливань при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних елементів деталей. Логоминов Віктор Олексійович, Гермашев Антон Горєвич, Дядя Сергій Іванович, Козлова Олена Борисівна. -u201405981; заява 02.06.2014; опубл. 10.12.2014. 15. Разработка комплекса экспериментальных методик исследования виброустойчивости процесса резания концевыми фрезами с разнонаклонными зубьями / Ю. Н. Внуков, С. И. Дядя, Е. Б. Козлова, А. Е. Зубарев // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві: збірник наукових праць [Текст]. – Вип.3(8). – О.:Наука і техніка, 2015. – С. 24-40. 16. Дядя С. И. Систематизация колебаний при концевом фрезеровании тонкостенных элементов деталей / С.И.Дядя, Е.Б.Козлова, Э.В.Кондратюк, А.Е.Зубарев, В.А.Кришталь // Вестник двигателестроения. №1, 2016. С.68-71. 17. Пат. UA 104343 Україна, МПК(2016.01) B23C 5/00; Фреза з регульованими кутами нахилу різальних кромок кожного зуба / Дядя С. І., Козлова О. Б., заявник та власник патенту ЗНТУ – №u201506918; заявл 13.07.2015; опубл 25.01.2016, Бюл. № 2.

Bibliography (transliterated): 1. Amosov I. S. Tochnost', vibracii i chistota poverhnosti pri tokarnoj obrabotke / I.S. Amosov, V.A. Skragan– Moskva- Leningrad: Mashgiz, 1958.-92s. 2. Kashirin A.I. Issledovanie vibracij pri rezanii metallov. /A.I. Kashirin. –Moskva-Leningrad: izd-vo akademii nauk SSSR. 1944. – 144s. 3. Krepak A. S. Issledovanie processa rezanija zharoprochnyh stalej koncevymi frezami s raznonaklonnymi zub'jami: avtoref. dis. na soiskanie nauchn. stepeni kand. tehn. nauk: spec. 05.171 «Teorija obrabotki rezaniem» / A.S. Krepak – Tula, 1972. – 23 s. 4. Logominov V.A. Formirovanie sherohovatosti obrabotannoj poverhnosti pri koncevom cilindricheskom frezerovanii tonkostennyh jelementov detalej: dis. kand. tehn. nauk. 05.03.01: zashhishhena 21.02.2013; utv.

25.04.2013 / *Logominov Viktor Alekseevich*. – Zaporozh'e, 2013. – 226 s. **5.** *Svinin V. M.* Upravlenie regenerativnymi avtokolebanijami pri frezerovanii na osnove moduljacji skorosti rezanija: Dis. d–ra tehn. nauk: 05.03.01 / *Svinin Valerij Mihajlovich*. – Irkutsk, 2008. – 342 s. **6.** *Tobias S. A.* Theory of Regenerative Machine Tool Chatter / *S. A. Tobias, W. Fiswick*. – London: Engineering, 1958. – 258

7. *Thusty J.* The Stability of Machine Tools Against Self-Excited Vibrations in Machining. / *J. Thusty, M. Polacek* // ASME International Research in Production Engineering. – 1963. – R. 465-474. **8.** *Olgac N.* Dynamic and stability of variable pitch milling / *N. Olgac R. Sipahi* // Journal of Vibration and Control, 2007. – № 13(7). – R. 1031-1043. **9.** *Budak E.* Analytical Prediction of Chatter Stability Conditions for Multi-Degree of Systems in Milling. Part I: Modeling / *E. Budak, Y. Altintas* // Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. – 1998. – Vol. 120. – R. 22–30. **10.** *Budak E.* An Analytical Design Method for Milling Cutters With Nonconstant Pitch to Increase Stability, Part 2: Application / *E. Budak* // ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2003. – Vol. 125. – R. 35–38. **11.** *Altintas Y.* Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechincs, Machine Tool Vibrations, and CNC Design / *Y. Altintas*. – 2013 – 365 p. **12.** *Altintas Y.* Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling / *Y. Altintas, E. Budak* // Annals of the CIRP. – 1995. – Vol. 44. – P. 357–362. **13.** *Altintas Y.* Analytical Prediction of Chatter Stability and Design for Variable Pitch Cutters/ *Y. Altintas, S. Engin, E. Budak* // Trans. ASME, Manufacturing and Engineering and Science. – 1999. – Vol. 121 – P. 173–178. **14.** Patent UA 94974 MPK (2006) G01N11/00; G01M7/02. Stend dlja doslidzhennja kolivan' pri kincevomu cilindrichnomu frezeruvanni tonkostinnih elementiv detalej. *Logominov Viktor Oleksijovich, Germashev Anton Igorevich, Djadja Sergij Ivanovich, Kozlova Olena Borisivna*. -u201405981; zajava 02.06.2014; opublik. 10.12.2014. **15.** Razrabotka kompleksa jeksperimental'nyh metodik issledovanija vibroustojchivosti processa rezanija koncevymi frezami s raznonaklonnymi zub'jami / *Ju. N. Vnukov, S. I. Djadja, E. B. Kozlova, A. E. Zubarev* // Informacijni tehnologii v osviti, nauci ta virobniectvi: zbirnik naukovih prac' Tekst.–Vip.3(8).–O.:Nauka i tehnika, 2015.–S. 24 – 40. **16.** *Djadja S. I.* Sistematizacija kolebanij pri koncevom frezerovanii tonkostennyh jelementov detalej / *S.I.Djadja, E.B.Kozlova, Je.V.Kondratjuk, A.E.Zubarev, V.A.Krishtal'* //Vestnik dvigatelestroenija. №1, 2016. S.68-71. **17.** Pat. UA 104343 Ukraina, MPK(2016.01) V23S 5/00; Freza z regul'ovanimi kutami nahilu rizal'nih kromok kozhnogo zuba / *Djadja S. I., Kozlova O. B.*, zajavnik ta vlasnik patentu ZNTU – №u201506918; zajavl 13.07.2015; opubl 25.01.2016, Bjul. № 2.

УДК 621.923.42

В.І. КАЛЬЧЕНКО, д-р техн. наук,
В.В. КАЛЬЧЕНКО, д-р техн. наук,
Я.В. КУЖЕЛЬНИЙ,
Д.В. КАЛЬЧЕНКО, Чернігів, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ СУМАРНОЇ СИЛИ РІЗАННЯ ОДИНИЧНИМ АБРАЗИВНИМ ЗЕРНОМ ПРИ ШЛІФУВАННІ ЗІ СХРЕЩЕНИМИ ОСЯМИ КРУГА ТА ДЕТАЛІ

Наведено 3D модель процесу різання пластичного матеріалу одиничним абразивним зерном, спосіб визначення профілю деталі. Була зображена 3D модель абразивного зерна та відповідні точки, в яких визначались сили різання. Визначено сумарну силу різання у відповідному перерізі абразивного зерна. Наведено метод створення різноманітних форм абразивного зерна, використовуючи безперервність твірної, що досягається використанням функції Хевісайда.

Ключові слова: різання пластичного матеріалу, сили різання

Приведена 3D модель процесса резания пластического материала единичным абразивным зерном, способ определения профиля детали. Была изображена 3D модель абразивного зерна и соответствующие точки, в которых определялись силы резания. Определено суммарную силу резания в соответствующем сечении абразивного зерна. Приведен метод создания различных форм абразивного зерна, используя непрерывность образующей, что достигается использованием функции Хевисайда.

Ключевые слова: резание пластического материала, силы резания

Given a 3D model of the cutting process the plastic material by a single abrasive grain, the method of determining the profile of the part. Was depicted the 3D model of the abrasive grain and the corresponding points, in which were determined cutting forces. Determined the total cutting force in the relevant section of the abrasive grain. Given the method of creating different shapes of abrasive grain by using the continuity of the generator, which is achieved by the use of Heavyside function.

Keywords: cutting process the plastic material, cutting force

1. Постановка проблеми. Процес різання абразивними зернами деталі під час шліфування, являє собою складний термомеханічний процес. Дослідження даного процесу дає можливість підвищити точність, якість поверхневого шару деталі та продуктивність процесу шліфування.

Складність дослідження даного процесу полягає у тому, що не всі кромки абразивних зерен будуть зніматися припуск. При цьому, певна частина роботи даних кромок буде витрачатися на деформування деталі та тертя в зоні контакту, а інша, безпосередньо, на процес різання.

Використання 3D моделі процесу різання одиничним абразивним зерном дає можливість дослідити вплив форми абразивного зерна, процеси, що відбуваються під час шліфування та визначити сумарну силу різання у відповідних точках даної моделі.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботі Філімонова Л.Н. [16] були досліджені процеси, які відбуваються під час шліфування одиничним абразивним зерном, проте не було дослідження впливу ріжучих кромок, які деформують деталь. У роботі [9] зображено методику визначення складових сил різання під час шліфування зі схрещеними осями інструменту та деталі. Проте не було враховано впливу процесу пружної деформації деталі та форми абразивного зерна під час шліфування. У роботі [5] розроблено математичну модель способу глибинного однопрохідного шліфування зі схрещеними осями деталі та круга. Проте не було розглянуто впливу деформуючих та ріжучих кромок під час шліфування. У роботі [12] були описані основи моделювання процесу різання методом скінчених елементів. Проте не наведено рекомендацій щодо створення 3D моделі процесу різання одиничним абразивним зерном.

3. Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Відсутність визначення сумарної сили різання одиничним абразивним зерном, використовуючи 3D модель процесу шліфування.

4. Мета статті. Метою даної роботи є визначення сумарної сили різання одиничним абразивним зерном під час шліфування та дослідження можливості створення різноманітних геометричних форм абразивного зерна. Це дасть можливість визначити сумарну силу різання із врахуванням ріжучих та деформуючих кромок.

5. Викладення основного матеріалу. Найбільший вплив на якість і точність поверхневого шару деталі мають фінішні операції обробки. Найбільш поширеною із таких операцій є шліфування. Велика кількість робіт [1-4, 6-8, 10, 11, 13-15] була присвячена вивченню даного процесу.

Під час шліфування процес зняття припуску буде відбуватися тільки тими абразивними зернами, що знаходяться над зв'язкою. Проте процес різання буде відбуватися лише тими зернами, які мають відповідну геометричну форму.

Існують різноманітні можливі форми абразивних зерен: конус, еліпс, тетраїд, циліндр, призма, піраміда та інші.

Для визначення профілю деталі [14], розглянемо шліфування круглого циліндра циліндричним кругом (рис. 1).

Проведемо переріз, який буде перпендикулярний до осей круга та деталі. Відносний рух круга і заготовки зводиться до його обертання навколо осі деталі.

Тому в будь-якій точці M профілю круга, швидкість відносного руху \bar{v} буде перпендикулярною до прямої O_1M , що з'єднує вісь деталі з досліджуваною точкою. Нормаль \bar{N} до профілю круга буде проходити по

радіусу, що з'єднує центр круга O_2 з точкою M . В довільній точці M профілю круга, нормаль \bar{N} не перпендикулярна швидкості \bar{v} .

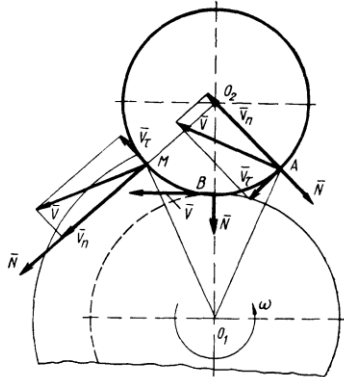


Рисунок 1 – Схема шліфування круглого циліндра циліндричним кругом

Розкладемо швидкість \bar{v} на складові в напрямку нормалі та дотичній до профілю круга:

$$\bar{v} = \bar{v}_n + \bar{v}_\tau \quad (1)$$

В результаті руху зі швидкість \bar{v}_n , точка M профілю круга буде врізатися у заготовку. В точці A профілю круга, нормаль \bar{N} не буде перпендикулярною до \bar{v} .

В точці B профілю круга, нормаль \bar{N} буде перпендикулярна до швидкості \bar{v} відносно руху. Також дана точка буде точкою контакту профілю круга і профілю поверхні деталі.

Умова контакту профілів круга та деталі, тобто умова перпендикулярності векторів \bar{N} і \bar{v} :

$$\bar{N} \cdot \bar{v} = 0 \quad (2)$$

Ця умова дає можливість визначити точки контакту з'єднувальних профілів в будь-який момент часу. Сукупність точок контакту в системі координат, яка пов'язана із заготовкою, буде профілем деталі.

Згідно з [9], схема обробки деталі (1) одиничним абразивним зерном (2) шліфувального круга (3) зображено на рис. 2.

В залежності з даним рисунком, зрізання металу відбувається в процесі поступового проникнення ріжучої кромки зерна в поверхню деталі. Спочатку пружне ковзання вершини зерна (положення а) змінюється пластичним зсувом металу (дуга ab) з утворенням напливів та зрізання шару металу при досягненні критичної глибини різання (дуга bc).

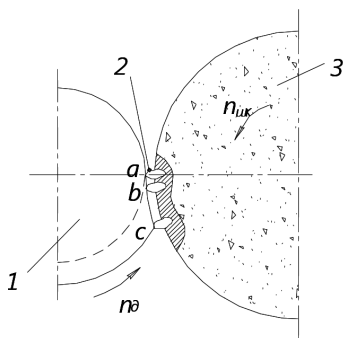


Рисунок 2 – Схема обробки деталі одним абразивним зерном шліфувального круга

У роботі [8] було створено 3D модель процесу різання одним абразивним зерном (рис. 3). В якості матеріалу деталі була вибрана Сталь 45, а матеріалом абразивного інструменту – Електрокорунд білий.

Вхідні данні були прийняті наступні: передній кут ріжучої кромки зерна $\gamma = -45^\circ$, радіус заокруглення вершини ріжучої кромки $\rho = 40$ мкм, глибина різання $a_z = 10$ мкм.

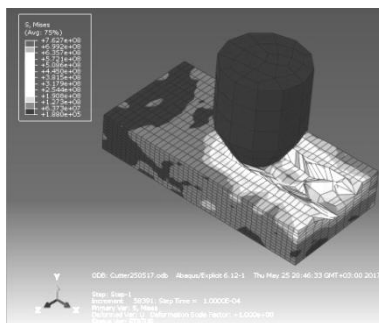


Рисунок 3 – 3D модель процесу різання одним абразивним зерном

У роботі Філімонова Л.Н [16] наведено зображення риски, яка утворена мікрорізанням заготовки зі сталі Р18 (рис. 4).

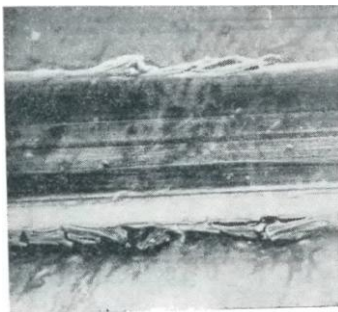


Рисунок 4 – Ділянка риски, утворена мікрорізнанням заготовки із сталі P18

На рис. 5 та 6 зображено абразивне зерно і відповідні точки, в яких визначались сили різання.

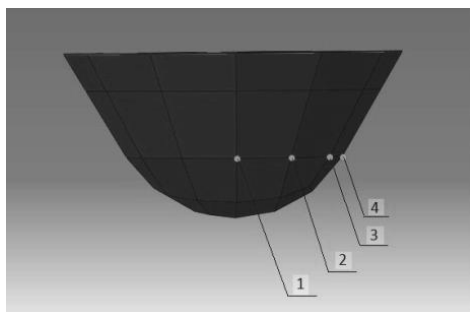


Рисунок 5 – Схема абразивного зерна
1-4 – відповідні точки, в яких визначались сили різання

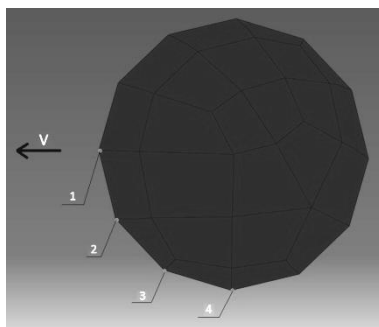


Рисунок 6 – Переріз абразивного зерна, в якому визначались сили різання
V – напрямок руху зерна

Використовуючи програмне забезпечення ABAQUS, було визначено силу різання у відповідних точках та їх сумарну силу різання.

Для точки 1 абразивного зерна, величина сили різання зображена на рис. 7.

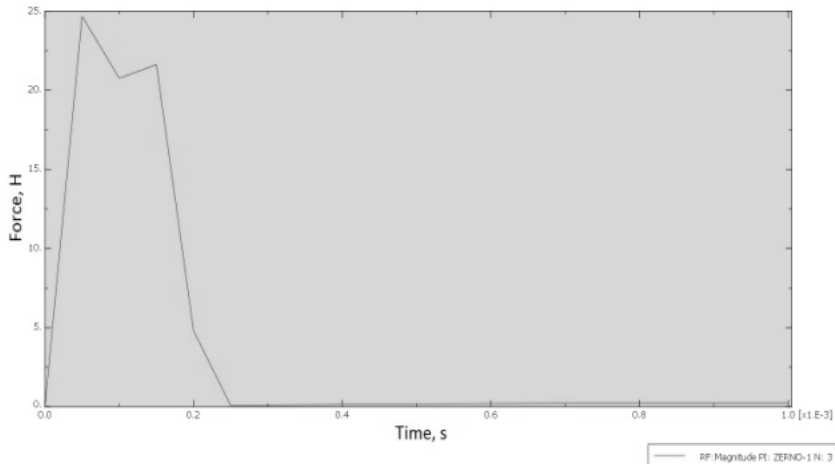


Рисунок 7 – Залежність часу від сили різання абразивного зерна в точці 1

Для точки 2 абразивного зерна, величина сили різання зображена на рис. 8.

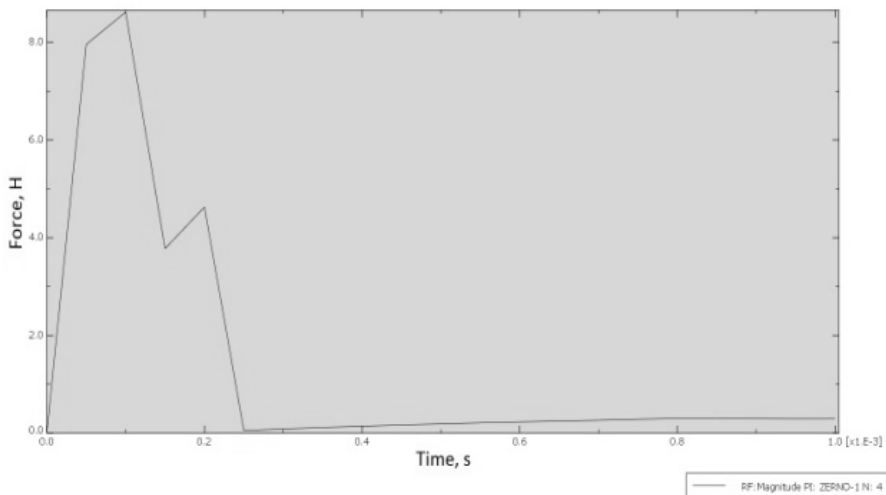


Рисунок 8 – Залежність часу від сили різання абразивного зерна в точці 2

Для точки 3 абразивного зерна, величина сили різання зображена на рис. 9.

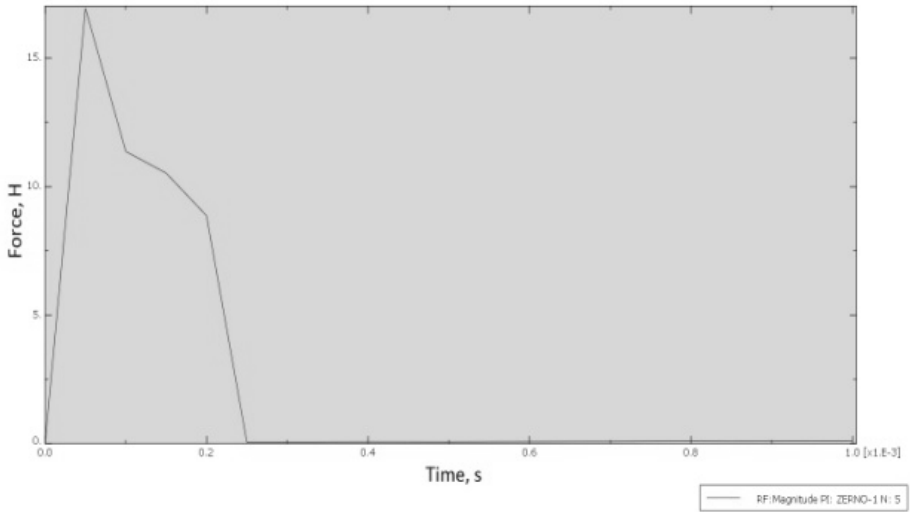


Рисунок 9 – Залежність часу від сили різання абразивного зерна в точці 3

Для точки 4 абразивного зерна, величина сили різання зображена на рис. 10.

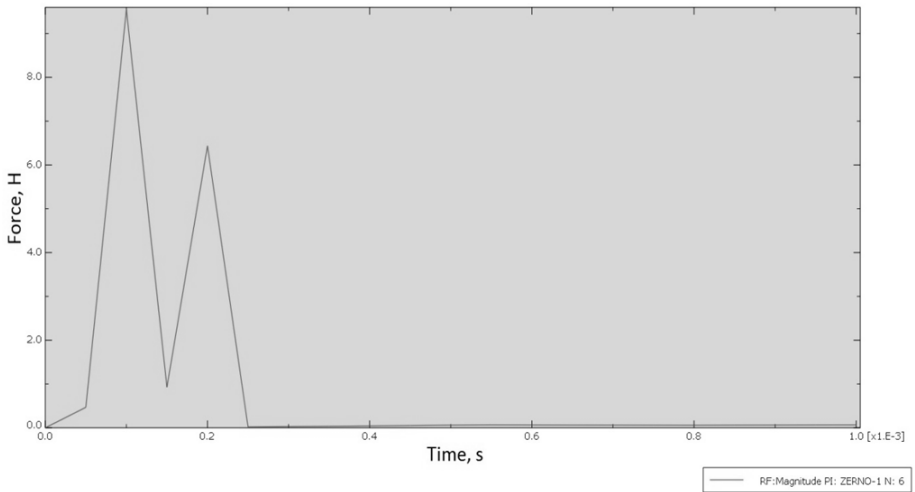


Рисунок 10 – Залежність часу від сили різання абразивного зерна в точці 4

Величина сумарної сили різання у відповідних точках абразивного зерна, зображена на рис. 11.

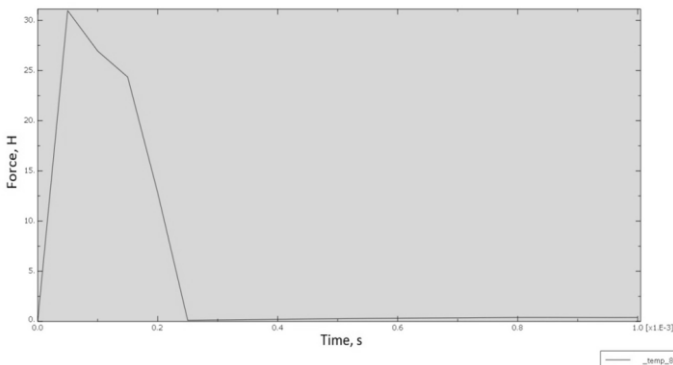


Рисунок 11 – Залежність часу від сумарної сили різання у відповідних точках абразивного зерна

Для даного прикладу форма перерізу абразивного зерна буде мати вигляд кола, таку ж форму буде мати і еліпсоїд обертання. Для абразивного зерна у вигляді тетраїда, форма буде визначатися за допомогою безперервної твірної функції Хевісайда в програмному забезпеченні Mathcad (рис. 12 та 13).

$$\phi_1 := \frac{\pi}{2} + 34.0224 \text{ deg} \quad \phi_2 := \phi_1 + 33.1903 \text{ deg} \quad \phi_3 := \phi_2 + 53.4513 \text{ deg} \quad \phi_4 := \phi_3 + 2.59.336 \text{ deg}$$

$$L1 := 102.5121 \quad \varepsilon 1 := 112.7872 \text{ deg} \quad \phi_5 := \phi_4 + 53.4513 \text{ deg} \quad \phi_6 := \phi_5 + 33.1903 \text{ deg}$$

$$\phi := \phi_1, (\phi_1 + 0.001 \text{ deg}) .. \phi_2$$

$$rz1(\phi) := \frac{L1 \cdot \sin(\varepsilon 1)}{\sin(\pi - \varepsilon 1 - \phi_2 + \phi)}$$

$$\phi := \phi_2, \phi_2 + 0.001 \text{ deg} .. \phi_3 \quad \varepsilon 2 := 104.336 \text{ deg} \quad L2 := 40$$

$$rz2(\phi) := \frac{L2 \cdot \sin(\varepsilon 2)}{\sin(\pi - \varepsilon 2 - \phi_3 + \phi)}$$

$$\phi := \phi_3, \phi_3 + 0.001 \text{ deg} .. \phi_4$$

$$rz3(\phi) := 40$$

$$\phi := \phi_4, \phi_4 + 0.001 \text{ deg} .. \phi_5 \quad \varepsilon 4 := 104.336 \text{ deg} \quad L4 := 40$$

$$rz4(\phi) := \frac{L2 \cdot \sin(\varepsilon 2)}{\sin(\pi - \varepsilon 2 + \phi_4 - \phi)} \quad L5 := 102.5121$$

$$\phi := \phi_5, \phi_5 + 0.001 \text{ deg} .. \phi_6 \quad \varepsilon 5 := 112.7872 \text{ deg}$$

$$rz5(\phi) := \frac{L5 \cdot \sin(\varepsilon 1)}{\sin(\pi - \varepsilon 1 + \phi_5 - \phi)}$$

Рисунок 12 – Вхідні данні та методика розрахунку в середовищі Mathcad

$$\phi_0 := \frac{\pi}{2} + 34.0224 \cdot \text{deg}$$

$$\phi_1 := \phi_0 + 33.1903 \cdot \text{deg}$$

$$\phi_2 := \phi_1 + 53.4513 \cdot \text{deg}$$

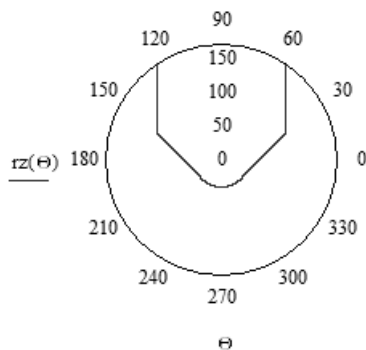
$$\phi_3 := \phi_2 + 2 \cdot 59.3336 \cdot \text{deg}$$

$$\phi_4 := \phi_3 + 53.4513 \cdot \text{deg}$$

$$\phi_5 := \phi_4 + 33.1903 \cdot \text{deg}$$

$$\begin{aligned} rz(\Theta) := & rz1(\Theta) \cdot (1 - \Phi(\Theta - \phi_1)) + rz2(\Theta) \cdot (\Phi(\Theta - \phi_1) - \Phi(\Theta - \phi_2)) \dots \\ & + rz3(\Theta) \cdot (\Phi(\Theta - \phi_2) - \Phi(\Theta - \phi_3)) + rz4(\Theta) \cdot (\Phi(\Theta - \phi_3) - \Phi(\Theta - \phi_4)) \dots \\ & + rz5(\Theta) \cdot \Phi(\Theta - \phi_4) \end{aligned}$$

$$\Theta := \phi_0, \phi_0 + 0.001 \cdot \text{deg} \dots \phi_5$$



$$\text{Cylindr}(\Theta, z) := M3(z) \cdot M6(\Theta) \cdot M1(rz(\Theta)) \cdot e4$$

$$\text{Cylind}(\Theta, z) := \text{submatrix}(\text{Cylindr}(\Theta, z), 1, 3, 1, 1)$$

$$\text{Zagotovka} := \text{CreateMesh}(\text{Cylind}, 0, 2 \cdot \pi - 0.0001 \cdot \text{deg}, -20, 10, 20, 20)$$

Рисунок 13 – Результати розрахунку в середовищі Mathcad

Форма абразивного зерна (рис. 14) залежить від радіусу заокруглення кромки ρ , що в свою чергу є функцією від кута φ :

$$\rho = f(\varphi) \quad (3)$$

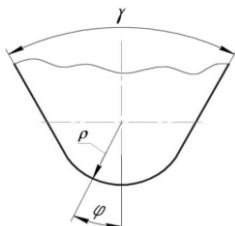


Рисунок 14 – Схема форми абразивного зерна
 γ – кут при вершині; ρ – радіус заокруглення ріжучої кромки;
 φ – кут, від якого залежить форма абразивного зерна

6. Висновки та перспективи розвитку. Вперше, використовуючи 3D модель, було визначено сумарну силу різання одиничним абразивним зерном під час шліфування. Дана 3D модель може бути використана для дослідження процесу різання деталей, що мають різноманітну поверхню. Також розглянуто спосіб створення форми абразивного зерна, використовуючи безперервність твірної, що досягається використанням функції Хевісайд. У майбутньому планується дослідження теплонапруженості наведеної 3D моделі процесу різання одиничним абразивним зерном під час шліфування.

Список використаних джерел: 1. *Бабенко Е.А.* 3D моделювання процесу алмазного шліфування методом кінцевих елементів / *Е.А. Бабенко, В.А. Федорович.* // Международный научно-технический сборник "Резание и инструмент в технологических системах". – 2010. – №78. – С. 16-23. 2. *Грабченко А. И.* Шлифование со скрещивающимися осями инструмента и детали: монография / *А. И. Грабченко, В. И. Кальченко, В. В. Кальченко.* – Чернигов: ЧДТУ, 2009. – 256 с. 3. *Грабченко А. И.* 3D-моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования: учебное пособие / *А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, В. А. Федорович.* – Х.: НТУ «ХПИ», 2006. – 364 с. 4. *Кальченко В.І.* Аналіз методів дослідження теплонапруженості під час процесу шліфування / *В. І. Кальченко, В. В. Кальченко, Я. В. Кузьельний* // Технічні науки та технології. – 2016. – №3 (5). – С. 43–50. 5. *Кальченко В. І.* Глибинне кругле шліфування зі скрещеними осями деталі і круга / *В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, М.А. Дмитренко* // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2008. – № 37. – С. 64–72. 6. *Кальченко В.І.* Дослідження способу шліфування валків стрічкопрокатних станів зі скрещеними осями інструмента та деталі / *В.І. Кальченко, В.В. Кальченко* і ін. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2016. – 4. – С. 80–87. 7. *Kalchenko V.* Determination of cutting forces in grinding with crossed axes of tool and workpiece / *Volodymyr Kalchenko, Andriy Yeroshenko et al.* // Acta mechanica et automatica. – 2017. – №1 (11). – P. 58–63. 8. *Кальченко В.І.* Моделювання процесу різання одиничним абразивним зерном при круглому глибинному шліфуванні / *В.І. Кальченко, О.Л. Деркач, Я.В. Кузьельний* // Технічні науки та технології. – 2017. – №2 (8). – С. 29-39. 9. *Кальченко В.И.* Определение составляющих силы резания при глубинном шлифовании поверхностей вращения ориентированным эльборовым кругом / *В. И. Кальченко, Н. Н. Погиба, Д. В. Кальченко* // Сверхтвердые материалы. – К.: Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2012. – № 2 (196). – С. 58-73. 10. *Кальченко В.І.* Теоретичне та

експериментальне дослідження процесу зняття припуску, зносу круга, точності формоутворення та теплонапруженості під час шліфування циліндричних та ступінчатих валів зі схрещеними осями деталі та круга / *В.І. Кальченко, В.В. Кальченко* і ін. // Технічні науки та технології. – 2016. – 4(6). – С. 35–43. **11.** *Клименко В.Г.* Теоретичні дослідження площі контакту різальної поверхні круга з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні з попереднім нахилом осі шпинделя / *В.Г. Клименко, І.М. Пижов* // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць – Харків: НТУ «ХП», 2016. – № 1(26). – С. 69–80. **12.** *Криворучко Д. В.* Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы (Монография) / *Д. В. Криворучко, В. А. Залого* – Сумы: Университетская книга, 2012. – 496с. **13.** *Kundrák J.* Diamond grinding wheels production study with the use of the finite element method / *J. Kundrák, V. Fedorovich* et al. // Journal of Advanced Research. – 2016. – №6 (7). – P. 1057–1064. **14.** *Родін П.Р.* Основы формообразования поверхностей резанием / *П.Р. Родін* – К: «Віща школа», 1977. – 192 с. **15.** *Федоренко Д.В.* Методология 3D моделирования процессов обработки труднообрабатываемых материалов / *Д.В. Федоренко, В.А. Федорович* и др. // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2016. – №11. – С. 208–232. **16.** *Филимонов Л.Н.* Высокоскоростное шлифование / *Л.Н. Филимонов* - Л.: Машиностроение, 1979, 248 с.

Bibliography (transliterated): **1.** *Babenko E.A.* 3D modelirovanie protcessaalmaznogo shlifovaniia metodom konechnykh elementov / *E.A. Babenko, V.A. Fedorovich.* // Mezhdunarodnyi nauchno-tekhnicheskii sbornik "Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh". – 2010. – №78. – S. 16-23. **2.** *Grabchenko A. I.* Shlifovanie so skreshchivaiushchimi osiami instrumenta i detali: monografiia / *A. I. Grabchenko, V. I. Kalchenko, V. V. Kalchenko.* – Chernigov : ChDTU, 2009. – 256 s. **3.** *Grabchenko A. I.* 3D-modelirovaniealmazno-abrazivnykh instrumentov i protcessov shlifovaniia : uchebnoe posobie / *A. I. Grabchenko, V. L. Dobroskok, V. A. Fedorovich.* – Kh.: NTU «KhP», 2006. – 364 s. **4.** *Kalchenko V.I.* Analiz metodiv doslidzhennia teponapruzhenosti pid chas protsesu shlifuvannia / *V. I. Kalchenko, V. V. Kalchenko, Ya. V. Kuzhelnyi* // Tekhnichni nauky ta tekhnolohii. – 2016. – №3 (5). – S. 43–50. **5.** *Kalchenko V. I.* Hlybynne kruhle shlifuvannia zi skhreshchenyiu osiami detali i kruha / *V. I. Kalchenko, V. V. Kalchenko, M. A. Dmytrenko* // Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu. – 2008. – № 37. – S. 64–72. **6.** *Kalchenko V.I.* Doslidzhennia sposobu shlifuvannia valkiv strichkoprokatnykh staniv zi skhreshchenyiu osiami instrumenta ta detali / *V.I. Kalchenko, V.V. Kalchenko* i in. // Visnyk Cherkaskoho derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu. Seria: Tekhnichni nauky. – 2016. – 4. – S. 80–87. **7.** *Kalchenko V.* Determination of cutting forces in grinding with crossed axes of tool and workpiece / *Volodymyr Kalchenko, Andriy Yeroshenko* et al. // Acta mechanica et automatica. – 2017. – №1 (11). – P. 58–63. **8.** *Kalchenko V.I.* Modeliuvannia protsesu rizannia odynynnym abrazyvnyim zernom pry kruhlomu hlybynnomu shlifuvanni / *V.I. Kalchenko, O.L. Derkach, Ya.V. Kuzhelnyi* // Tekhnichni nauky ta tekhnolohii. – 2017. – №2 (8). – S. 29–39. **9.** *Kalchenko V. I.* Opredelenie sostavliaiushchikh sily rezaniia pri glubinnom shlifovanii poverkhnosti vrashcheniia oriientirovannym elborovym krugom / *V. I. Kalchenko, N. N. Pogiba, D. V. Kalchenko* // Sverkhverdye materialy. – K.: Institut sverkhverdnykh materialov im. V. N. Bakulia NAN Ukrainy, 2012. – № 2 (196). – S. 58–73. **10.** *Kalchenko V.I.* Teoretychne ta eksperymentalne doslidzhennia protsesu zniattia pryusku, znosu kruha, tochnosti formovrennia ta teponapruzhenosti pid chas shlifuvannia tsylindrychnykh ta stupinchatykh valiv zi skhreshchenyiu osiami detali ta kruha / *V.I. Kalchenko, V.V. Kalchenko* i in. // Tekhnichni nauky ta tekhnolohii. – 2016. – 4(6). – S. 35–43. **11.** *Klymenko V.H.* Teoretychni doslidzhennia ploskhi kontaktu rizalnoi poverkhnii kruhu z detalliu pry ploskomu tortsevomu shlifuvanni z poperednim nakhylom osi shpyndelia / *V.H. Klymenko, I.M. Pyzhov* // Vysoki tekhnolohii v mashynobuduvanni: zb. nauk. prats. – Kharkiv: NTU «KhP», 2016. – № 1(26). – S. 69–80. **12.** *Krivoruchko D. V.* Modelirovanie protcessov rezaniia metodom konechnykh elementov: metodologicheskie osnovy (Monografiia) / *D. V. Krivoruchko, V. A. Zaloga* – Sумы: Universitetskaia kniga, 2012. – 496с. **13.** *Kundrák J.* Diamond grinding wheels production study with the use of the finite element method / *J. Kundrák, V. Fedorovich* et al. // Journal of Advanced Research. – 2016. – №6 (7). – P. 1057–1064. **14.** *Rodin P.R.* Основы формообразования поверхностей резанием / *P.R. Rodin* – К: «Віща школа», 1977. – 192 с. **15.** *Fedorenko. D.V.* Методология 3D моделирования процессов обработки труднообрабатываемых материалов / *D.V. Fedorenko, V.A. Fedorovich* и др. // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2016. – №11. – С. 208–232. **16.** *Filimonov L.N.* Высокоскоростное шлифование / *L.N. Filimonov* - Л.: Машиностроение, 1979, 248 с.

УДК 621.793.7

В.М. ТОНКОНОГИЙ, д-р техн. наук,
А.С. СІНЬКОВСЬКИЙ, канд. техн. наук,
О.В. РИБАК, Одеса, Україна

ВРАХУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОРШКІВ НА ОСНОВІ TiC, ПЛАКОВАНОГО Ni(P), ПРИ РОЗРОБЦІ САПР ТП

У даній роботі проводиться дослідження покриттів, нанесених за допомогою плазмового напилювання. Покриття складаються з порошку карбіду титану, плакованого твердим розчином фосфору в нікелі. Докладно описано процес плакування та структуру одержаних покриттів. З метою визначення коефіцієнта тертя та величини зношування в умовах граничного та сухого тертя, плазмові покриття випробували на машині тертя СМЦ-2 по схемі ролик – колодочка. На основі експериментальних даних побудовані графіки залежності коефіцієнта тертя від величини пройденого шляху. Аналіз наведених графіків виявив закономірності взаємодії покриттів в процесі тертя. Випробування на зносостійкість показали, що найкращі показники мають покриття, що складаються з 65% TiC та 35% Ni(P). Покриття на основі TiC можна також наносити на ріжучий інструмент, відтак це перспективний напрямок подальших досліджень.

Ключові слова: плазмові покриття, композиційні порошки, плакування, триботехнічні властивості, зносостійкість.

В данной работе проводится исследование покрытий, нанесенных с помощью плазменного напыления. Покрытия состоят из порошка карбида титана, плакированного твердым раствором фосфора в никеле. Подробно описано процесс плакирования и структура полученных покрытий. С целью определения коэффициента трения и величины износа в условиях предельного и сухого трения, плазменные покрытия испытывали на машине трения СМЦ-2 по схеме ролик – колодочка. На основе экспериментальных данных построены графики зависимости коэффициента трения от величины пройденного пути. Анализ приведенных графиков выявил закономерности взаимодействия покрытий в процессе трения. Испытания на износостойкость показали, что наилучшие показатели имеют покрытия, которые состоят из 65% TiC и 35% Ni(P). Покрытия на основе TiC можно также наносить на режущий инструмент, таким образом, это перспективное направление дальнейших исследований.

Ключевые слова: плазменные покрытия, композиционные порошки, плакирование, триботехнические свойства, износостойкость.

In this article the research of coatings applied with plasma spraying is carried out. Coatings are composed of the powder of Titanium carbide plated with the solid solution of phosphorus in nickel. The plating process and the structure of the resulting coatings are described in detail. In order to define the coefficient of friction and the wear rate during the limit friction and dry friction, plasma coatings were tested on a friction machine СМЦ-2 after the roll-block pattern. On the basis of experimental data distance covered dependence plots for the coefficient of friction were built. Analysis of those plots has identified the general trend of interaction of coatings in the process of friction. Testing on the wear resistance has shown that the coatings composed of 65% TiC and 35% Ni(P) give the best result. Coatings based on TiC also can be applied on a cutting tool, so this is a promising direction for the future research.

Keywords: plasma coating, composite powder, plating, tribotechnical properties, wear resistance.

Вступ

При розробці систем автоматизованого проектування технологічних процесів (САПР ТП) в області створення та обробки напилених покриттів необхідно враховувати їхні триботехнічні властивості, міцність, твердість, зносостійкість, міцність зчеплення з основою та інші властивості, які впливають на ефективність прийняття рішень щодо використання того чи іншого матеріалу у певному технологічному процесі [1-6]. Велика кількість факторів, що впливають на результат, спонукали до детального вивчення вищенаведених властивостей конкретного виду матеріалів.

Метод хімічного нанесення металічних покриттів відомий давно, але через нестабільність перебігу хімічних реакцій він не набув широкого застосування у промисловості. Виділення металу під час протікання даного процесу часто відбувалося спонтанно, некеровано. Замість утворення покриттів на необхідній поверхні, метали виділялись з розчину їхніх солей миттєво, осідаючи на дні і стінках ємності. В результаті досліджень процесів хімічного плакування, проведених на кафедрі Технології конструкційних матеріалів та матеріалознавства Одеського національного політехнічного університету, було розроблено надійні стабілізатори ОП-1 та ОП-2 (втяжки з екстрактів компонентів рослинного походження), завдяки яким цей процес став технологічно надійним [7].

У роботі [8] наведені результати досліджень деяких характеристик порошків карбиду вольфраму WC, плакованих твердим розчином фосфору в нікелі Ni(P), і плазових покриттів на їхній основі. Однак, не зважаючи на позитивні результати, широкого використання в техніці вони не знайшли через дефіцит вольфраму, поклади якого в Україні відсутні. Тому для створення зносостійких плазових покриттів у даній роботі було використано карбід титану, а по рудних запасах титану Україна займає одне з перших місць у світі.

На порошки карбиду титану TiC доцільно наносити метали, які добре змочують їхню поверхню. Такими металами є, зокрема, нікель та кобальт. Згідно з існуючими даними [9, с.224-225], при температурі 1500°C кут змочування у нікелю дорівнює нуль, а у кобальта – 5 градусів. Тому в своїх дослідженнях ми зосередились на плакуванні TiC нікелем.

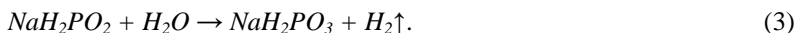
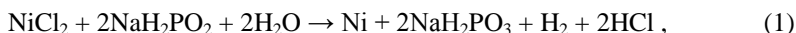
Забезпечення високого рівня продуктивності деталі з покриттям полягає не лише у досягненні високої якості поверхні, а й міцності зчеплення покриття з основою. Механічні властивості зразка з покриттям визначаються у тому числі і співвідношенням характеристик пластичності (міцності) матеріалів покриття і основи, а також адгезійною міцністю. [10] У більш міцних покриттях спостерігається відшаровування покриття від основи як одного цілого, у той час як більш пластичні покриття формують ненаскрізні тріщини, але зберігаються на підложці до високих ступенів деформації. Щоб оптимізувати процес експлуатації покриттів, слід визначити такі режими

їхньої обробки, які дозволяють забезпечити високу якість поверхні і не допустити відшаровування у подальшій роботі.

Мета даної роботи полягає у вивченні триботехнічних властивостей покриттів, одержаних за допомогою плазмового напилювання порошків на основі карбиду титану, плакованого Ni(P), випробуванні таких покриттів на зносостійкість і визначенні умов, за яких ріжучий інструмент із зазначеним покриттям може ефективно використовуватись у промисловості.

Дослідження

Оцінку кількості металу, що осіла на поверхню порошку, можна провести за кольором розчину. На початковій стадії процесу він голубий, але чим більше металу осідає, тим світлішає розчин. Після того, як метал із розчину осяде повністю, він стає зовсім прозорим. Відповідно до сучасних уявлень, сумарний процес хімічного нанесення нікелю включає наступні реакції:



Як випливає з наведених реакцій, під час хімічного плакування окрім нікелю, в незначній кількості осаджується також фосфор. Слід зазначити, що його наявність не має суттєвого впливу на механічні властивості плазмового покриття, але дещо зменшує коефіцієнт тертя одержаного матеріалу. Дослідження показали, що фосфор в покритті є корисним, якщо його вміст не перевищує 5%.

Процес плакування порошків включає наступні стадії:

1. Підготовка поверхні порошку карбиду титану.
2. Процес нанесення Ni(P).
3. Термічна обробка покритого порошку.

Підготовка поверхні порошку полягає в знежирюванні його спиртом $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, травленні порошку в розчині хлоридної кислоти, подальшому промиванні у воді, після чого його слід знову протравити в слабкому розчині хлоридної кислоти. Для плакування TiC слід використовувати ванну наступного складу: сульфат амонію $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, сульфат нікелю $(\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O})$ або хлорид нікелю $(\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$, ацетат натрію $(\text{CH}_3\text{COONa})$, в якості відновника – гіпофосфіт натрію $(\text{NaH}_2\text{PO}_2)$ та стабілізатор ОПІ. Кількісний склад солей ванни залежить від процентного співвідношення TiC – Ni(P). Процес плакування проводять до повного знебарвлення розчину.

Частинки порошку можуть мати різну форму: куба, шару, двох пірамід чи конусів, з'єднаних своїми основами, а також призми, циліндра,

паралелепіеда та інші. Кожний тип порошку можна привести до близької за формою до однієї з наведених геометричних фігур. Наприклад, якщо частинки мають форму, близьку до кулі, то за допомогою мікроскопа знаходимо їхній середній діаметр у фракції. Тоді, провівши відповідні розрахунки, можна визначити приблизну товщину покриття на кожній частинці.

Нехай потрібно одержати 100 г порошку наступного складу: 60% TiC і 40% Ni(P) вагових. В цьому випадку маса порошку TiC дорівнює 60 г. Тоді середню кількість його частинок можна визначити за формулою:

$$N = \frac{6 \cdot M_{TiC}}{\rho_{TiC} \cdot \pi d_0^3}, \quad (4)$$

де M_{TiC} – маса TiC, ρ_{TiC} – його густина, d_0 – середній діаметр у фракції. Маса осаду на кожній частинці становитиме:

$$m_{NiP} = \frac{M_{Ni(P)}}{N}. \quad (5)$$

Кінцевий діаметр частинки після нанесення покриття d_k буде:

$$d_k = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot M_{Ni(P)}}{\pi \cdot \rho_{Ni(P)}} + d_0^3} \quad (6)$$

Тоді товщина покриття становитиме:

$$\delta = \frac{d_k - d_0}{2}. \quad (7)$$

Зважаючи на малу кількість фосфору в покритті, можна допустити, що густина $\rho_{Ni(P)} = \rho_{Ni}$.

На швидкість хімічного нікелювання впливають температура розчину, співвідношення концентрацій гіпофосфіту натрію і сульфату нікелю, концентрація стабілізуючої добавки та водневий показник рН розчину. Знаючи швидкість нанесення Ni(P) на поверхню поршку ϑ (мкм/год), визначаємо кількість часу, необхідного для цієї операції:

$$\tau = \frac{\delta}{\vartheta}. \quad (8)$$

В наших експериментах вищенаведені параметри були наступними: співвідношення NaH_2PO_2 та $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ становило 0,83, температура розчину $t = 90 \dots 100^\circ\text{C}$, стабілізатор ОПІ – 5 мл/л, рівень рН = 5,0...5,5, швидкість нанесення покриття $\vartheta = 10 \dots 15$ мкм/год. Після плакування порошок промивається спочатку водою, а потім спиртом, і поміщається в сушильну шафу з температурою 200°C , де витримується протягом двох годин. Готовий

порошок просівається через сита, де визначається його фракція, а також сипучість і насипна вага.

Нанесення покриттів проводилось на плазмовій установці Київ-7 потужністю 100кВт на філії кафедри ТКМіМ "Плазмотехнології" Федюк. В якості плазмоутворюючого газу використовували суміш повітря і пропан-бутану [11]. Перспективна суміш повітря і МАФ не була застосована тому, що вона виділяє надмірну кількість тепла і значно підвищує температуру, а це призводить до перегріву Ni(P) і його підвищених втрат через випаровування. Режими напилювання були наступними: величина струму – 200А, напруга – 200В, відстань від перерізу сопла до поверхні деталі у межах 120 ... 140мм. Таким чином, при напилюванні використовувалась потужність вдвічі менша від тієї, що дозволяє установка.

Отримані покриття мають білий колір і не окислюються. На рис. 1 наведена мікроструктура покриття, де позначені карбіди TiC (світлі плями) і металічна складова, твердість якої $H_{50} = 10350\text{МПа}$. Така твердість значно вища за твердість чистого нікелю, що свідчить про наявність у складі покриття більш твердої структури, найімовірніше це хімічна сполука Ni_3P . В покритті також спостерігаються пори близько 12%. При терті вони грають роль масляних карманів, які зменшують величину тертя ковзання. На структуру нанесена мікрометрична сітка з ціною поділки 10мкм для оцінки розмірів карбідів.

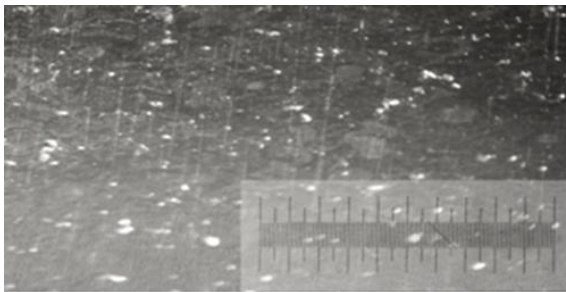


Рисунок 1 – Мікроструктура плазмового покриття TiC+Ni(P) після комп'ютерної обробки за допомогою програми FastStone Image Viewer 6.0

Для вивчення триботехнічних властивостей одержаних покриттів дослідження проводили на машині тертя СМЦ-2 по схемі ролик - колодочка, а в якості контртіла була сталь після загартовування та низького відпуску. Ролики з плазмовим покриттям насаджували на оправку і міцно затискали гайкою, встановлювали на круглошліфувальному верстаті та обробляли до шорсткості поверхні $Rz\ 6.30$. Діаметр ролика 5 см, площа контакту поверхонь тертя $15.7\ \text{см}^2$. Випробування проводили з метою визначення коефіцієнта тертя та величини зношування в умовах граничного та сухого тертя.

Граничним вважається тертя між поверхнями, що труться при товщині мастильного шару менше 0,1 мкм. Для створення таких умов на поверхню ролика, який обертається, в момент входу його під колодочку подавалося одну краплю мастила за хвилину. Для порівняння, дослідження також проводили на зразках з покриттям WC +Ni(P) (карбід вольфраму, плакований твердим розчином фосфору в нікелі).

Результати та аналіз отриманих даних

За результатами експериментальних досліджень, у програмному пакеті MatLab було побудовано криві залежності коефіцієнта тертя від величини пройденого шляху. Для більш зручного аналізу дискретних даних, вони наведені у вигляді кусочно-поліноміальної апроксимуючої функції, представленої за допомогою кубічної сплайн-інтерполяції. Величину пройденого шляху визначали за діаметром ролика та кількістю його обертів. На рис. 2а і 2б зображено графіки результатів досліджень при граничному терті і тисках у 2МПа та 10МПа. Покриття, в залежності від номеру, мають наступний склад: 1) 65% TiC та 35% Ni(P); 2) 50% TiC та 50% Ni(P); 3) 35% TiC та 65% Ni(P); 4) 65% WC та 35% Ni(P); 5) 50%TiC та 50% Ni(P). Контртілом у всіх випадках були сталеві колодки і лише у випадку кривої 5, наведеної для порівняння, використали БрАЖМц 10–3–1,5.

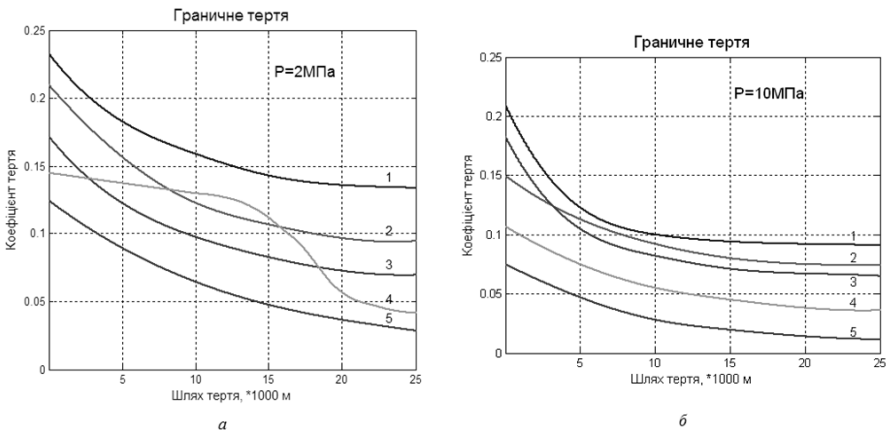


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта тертя від пройденого шляху при граничному терті і тиску 2 МПа (а) та 10 МПа (б)

З рис. 2а і 2б можна зробити висновок, що на характер залежності коефіцієнта тертя від шляху при граничному терті впливає хімічний склад плазмового покриття у процентному співвідношенні, величина тиску і природа контртіла. Для всіх композицій покриттів при збільшенні шляху

тертя коефіцієнт тертя зменшується незалежно від тиску і швидкості ролика, хоча у карбиду вольфраму при $P = 2\text{МПа}$ на початковій стадії ця залежність має свої особливості: крива спочатку майже не змінюється, а потім стрімко падає. Це можна пояснити поганим приробленням поверхні з цим покриттям.

Дещо інша залежність коефіцієнта тертя від пройденого шляху спостерігається для тих самих покриттів при сухому терті. Графіки цієї залежності представлені на рис. 3а і 3б. Зазначені номери кривих відповідають хімічному і кількісному складу покриттів з попереднього рисунку.

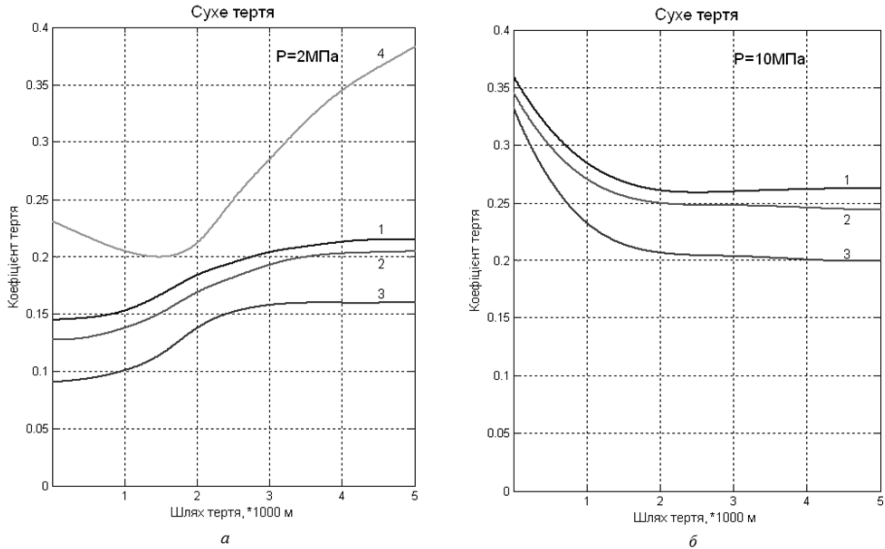


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта тертя від пройденого шляху при сухому терті і тиску 2 МПа (а) та 10 МПа (б)

Відсутність мастил призводить до нагрівання поверхонь, що труться, з'являються ділянки схоплювання, що, в свою чергу, призводить до збільшення коефіцієнта тертя до того моменту, коли процес стабілізується (рис.3а). Виняток становить крива під номером 4, побудована для покриття на основі WC, яка спочатку фіксує зниження коефіцієнта тертя, а потім різке його зростання. При тиску 10 МПа (рис. 3б) усі покриття, окрім композиції, що містить WC, хоча і мають високе значення коефіцієнту тертя, але підкоряються закономірностям його зниження і подальшої стабілізації. Щодо покриття на основі WC (композиція №4), значення його коефіцієнта тертя на рис.3б відсутні, тому що вже при тиску 6 МПа після пробігу в 3,8 км спостерігалось міцне схоплювання, і дослідження ми були змушені зупинити. Більш високий рівень протидії схоплюванню покриттів, у складі яких є TiC,

можна пояснити більш високою температурою плавлення цього карбіду у порівнянні з WC, і більш низьким коефіцієнтом тертя.

Випробування на зносостійкість (табл. 1) теж показали переваги покриттів на основі карбіду титану.

Таблиця 1 – Залежність величини зношування від тиску при граничному і сухому терті

№	Матеріал покриття	Характер тертя	Зношування (г)				
			Тиск на зразок, МПа (швидкість ковзання: 1,31 м/с)				
			2	4	6	8	10
1	65% TiC+35%Ni(P)	Граничне	0,0000	0,0000	0,0000	0,0012	0,0035
		Сухе	0,0002	0,0002	0,0082	0,0284	0,0495
2	50% TiC+50%Ni(P)	Граничне	0,0000	0,0000	0,0007	0,0025	0,0064
		Сухе	0,0005	0,0150	0,0300	0,0515	0,0784
3	35% TiC+65%Ni(P)	Граничне	0,0000	0,0009	0,0026	0,0047	0,0073
		Сухе	0,0081	0,0243	0,0420	0,0693	0,1055
4	65% WC+35%Ni(P)	Граничне	0,0000	0,0003	0,0011	0,0026	0,0052
		Сухе	0,0285	0,0521	0,0750	—	—

Зносостійкість вимірювали шляхом зважування роликів до і після випробувань, ретельно промивши їх у спирті і помістивши в сушильну шафу при температурі 80°C. Найкращі результати показали зразки, в покритті яких було 65% TiC. В умовах сухого тертя покриття, до складу яких входить карбід титану, за показниками зносостійкості значно перевищують аналогічні покриття на основі WC.

Покриття на основі TiC можна використовувати не лише в якості зносостійких матеріалів для нанесення на поверхні деталей, що труться. Їх можна також наносити на ріжучий інструмент. На рис.4а показано профіль різця з плазмовим покриттям, а на рис.4б – переріз напиленого шару, товщина якого, в середньому, становить 3мм.

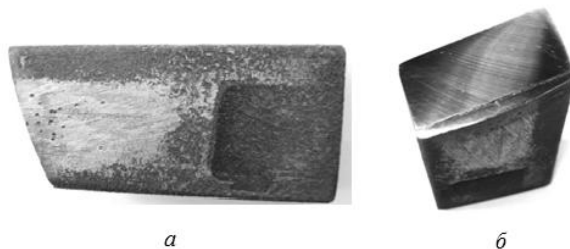


Рисунок 4 – Профіль різця з плазмовим покриттям TiC+Ni(P) (а) та переріз оправки різця з цим покриттям (б)

Висновки

За результатами експериментів, умови проведення яких викладені у рамках даної роботи, було проаналізовано триботехнічні характеристики покриттів з різним процентним співвідношенням TiC та Ni(P) та різною природою контртіла. Дослідження проводились при сухому та граничному терті і тисках у 2МПа та 10МПа. Для порівняння наводились результати покриттів на основі карбіду вольфраму, плакованого Ni(P). Знайдено пояснення поведінки побудованих графіків залежності коефіцієнта тертя від пройденого шляху, що виявило закономірності взаємодії покриттів в процесі тертя.

Переваги покриттів на основі карбіду титану показали також випробування на зносостійкість. Встановлено, що найкращу зносостійкість мають покриття, що складаються з 65% TiC і 35% Ni(P).

Плазмові покриття на основі TiC+Ni(P), нанесені на оправку різця, мають непогані ріжучі властивості. Вони можуть використовуватись при обробці алюмінію, магнію та їхніх сплавів, мідних сплавів, а також низьковуглецевих сталей і сірого чавуну. Збільшення в покритті процентного співвідношення TiC дозволить створити ріжучі інструменти, здатні обробляти середньовуглецеві сталі. Проте слід зазначити, що для цього потрібно перейти на режим надзвукового напилювання щоб збільшити міцність зчеплення покриття з основою. Отримані результати будуть використані при розробці САПР ТП нанесення та обробки покриттів.

Список використаних джерел: 1. *Петров С.В.* Плазма продуктів сгорания в инженерии поверхности / *С.В. Петров, А.Г. Сааков.* – Київ: Топас, 2000. – 220 с. 2. *Сіньковський А.С.* Теорія та методи газотермічного напилювання: (навч. посіб.). – Одеса: Астропринт, 2014. – 206 с. 3. *Сіньковський А.С.* Матеріали для напилення і наплавлення: конспект лекцій. – Одеса: Наука і техніка, 2008. – 126 с. 4. *Балдаев Л.Х.* Газотермическое напыление / [*Л.Х. Балдаев, В.Н. Борисов* и др.]; под ред. *Л.Х. Балдаева.* – М.: Маркет ДС, 2007. – 344 с. 5. *Борисов Ю. С.* Газотермические покрытия из порошковых материалов: справочник. / *Ю.С. Борисов, Ю. А. Харламов* и др. – Київ: Наукова думка, 1987. – 543с. 6. *Тонконогий В.М.* Моделирование прочности сцепления износостойких покрытий с подложкой с помощью виртуальных конечных элементов // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: ХПИ, 2004. – Вып. 66. – С. 191 – 196. 7. *Сіньковський А. С.,* Износостойкие плазменные покрытия из композиционных порошков / *А.С. Сіньковський, В.К. Толоч і ін.* // Защитные покрытия на металлах. Выпуск 10. – К: Наукова думка, 1976. 8. *Сіньковський А.С., Рибак О.В.* Композиційні порошкові матеріали на основі карбіду вольфраму для газотермічного напилювання / Матеріали Міжнародної Інтернет-конференції «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи (МТН-2016)». – Вінниця: ТОВ "Нілан-ЛТД", 2016. – с.179-181. 9. *Котельников Р.Б.* Особо тугоплавкие элементы и соединения (Справочник) / *Р.Б. Котельников, С.Н. Башлыков і ін.* – М.: Металлургия, 1966. – 372с. 10. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / [*Балахонов Р.Р., Болеста А.В.* и др.]; под ред. *В.Е. Панина.* – Новосибирск, Сибирское отделение Российской академии наук, 2006. – 519 с. 11. Пат. 70854 А України, МКІ Е21В1/26. Спосіб одержання пульсуючого струменя ударної дії та пристрій для його реалізації / *Савченко Н.В., Яхно О.М.* / Заявл. 30.12.2003, Опубл. 15.10.2004. Бюл.№10. – 2 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Petrov S.V.* Plazma produktov sgoranija v inzhenerii poverhnosti / *S.V. Petrov, A.G. Saakov*. – Kiiv: Topas, 2000. – 220 s. 2. *Sin'kovs'kij A.S.* Teorija ta metodi gazotermichnogo napiljuvannja: (navch. posib.). – Odesa: Astroprint, 2014. – 206 s. 3. *Sin'kovs'kij A.S.* Materiali dlja napilennja i naplavlennja: konspekt lekcij. – Odesa: Nauka i tehnika, 2008. – 126 c. 4. *Baldaev L.H.* Gazotermicheskoe napylenie / [*L.H. Baldaev, V.N. Borisov* i dr.]; pod red. *L.H. Baldaeva*. – M.: Market DS, 2007. – 344 s. 5. *Borisov Ju. S.* Gazotermicheskie pokrytija iz poroshkovykh materialov: spravocnik./ *Ju.S. Borisov, Ju. A. Harlamov* i dr. – Kiiv: Naukova dumka, 1987. – 543s. 6. *Tonkonogij V.M.* Modelirovanie prochnosti scepnenija iznosostojkikh pokrytij s podlozhkoj s pomoshh'ju virtual'nykh konechnykh jelementov // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah. – Har'kov: HPI, 2004. – Vyp. 66. – S. 191 – 196. 7. *Sin'kovs'kij A. S.*, Iznosostojkie plazmennye pokrytija iz kompozicionnykh poroshkov / *A.S. Sin'kovskij, V.K. Tolok* i in. // Zashhitnye pokrytija na metallah. Vypusk 10. – K: Naukova dumka, 1976. 8. *Sin'kovs'kij A.S., Ribak O.V.* Kompozicijni poroshkovi materiali na osnovi karbidu vol'framu dlja gazotermichnogo napiljuvannja / Materiali Mizhnarodnoi Internet-konferencii «Molod' v tehnicnih naukah: doslidzhenja, problemi, perspektivi (MTN-2016)». – Vinnicja: TOV "Nilan-LTD", 2016. – s.179-181. 9. *Kotel'nikov R.B.* Osobo tugoplavkie jelementy i soedinenija (Spravocnik) / *R.B. Kotel'nikov, S.N. Bashlykov* i in. – M.: Metallurgija, 1966. – 372s. 10. Poverhnostnye sloi i vnutrennie granicy razdela v geterogennykh materialah / [*Balahonov R.R., Bolesta A.V. i dr.*]; pod red. *V.E. Panina*. – Novosibirsk, Sibirskoe otdelenie Rossijskoj akademii nauk, 2006. – 519 s.. 11. Pat. 70854 A Ukraini, MKI E21V1/26. Sposib oderzhannja pul'sujuchoho strumenja udarnoї diї ta pristirij dlja jogo realizacii / *Savchenko N.V., Jahno O.M.* / Zajavl. 30.12.2003, Opubl. 15.10.2004. Bjul.№10. – 2 s.

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621

Ю.Г. ГУЦАЛЕНКО, Харьков, Україна

ПРИМЕНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОРЕЗНЫХ ПРУЖИН В МАШИНОСТРОЕНИИ

Наводяться приклади різних галузевих застосувань і патентного захисту технічних рішень, включаючи верстатострументальні для високопродуктивної вібраційної лезової обробки різанням. Розглядаються конструкторсько-технологічні перспективи вдосконалення і використання прорізних пружин. Відзначається зацікавленість авіаційно-космічного та атомного машинобудування, відкритість перспективи застосування в забезпеченні високопродуктивної алмазно-абразивної обробки і обслуговуючих такої обробку високоточних стежачих пристроях.

Ключові слова: вібраційна лезова обробка, прорізні пружини

Приводятся примеры различных отраслевых применений и патентной защиты технических решений, включая станкоинструментальные для высокопроизводительной вибрационной лезвийной обработки резанием. Рассматриваются конструкторско-технологические перспективы совершенствования и использования прорезных пружин. Отмечается заинтересованность авиационно-космического и атомного машиностроения, открытость перспективы применения в обеспечении высокопроизводительной алмазно-абразивной обработки и обслуживающих такую обработку высокоточных следящих устройствах.

Ключевые слова: вибрационная лезвийная обработка, прорезные пружины

There are given examples of various industry applications and patent protection of technical solutions, including machine tools for high-performance vibratory blade cutting. The design and technological prospects of improving and using slotted springs are considered. There are an interest in aerospace and nuclear engineering, the openness of the prospect of application for high-performance diamond-abrasive processing and servicing its high-precision tracking devices.

Keywords: vibratory blade cutting, slotted springs

Введение

Предлагаемый обзор является второй частью статейной диалогии автора, посвященной истории и современным перспективам разработок прорезных пружин для машиностроительных применений. Внимание первой части (Заметки по истории, систематике и моделированию прорезных пружин) в основном сосредоточено на представлении геометрии и функциональных особенностей, а также конструкторско-технологического моделирования прорезных пружин и их поведения в виртуальных моделях эксплуатации. Вторая в основном рассматривает применение прорезных пружин в традиционной и новейшей современной, а также перспективной реальной практике.

Прорезная пружина в конструкциях отраслевого машиностроения

Прорезные пружины характеризуются многоотраслевым использованием в решении различных технических задач. Их применение, например, в силомоментных датчиках имеет многолетний опыт и простирается от робототехнических устройств [1] до геологоразведочных установок и нефтегазовых бурильных колонн [2].

Моментомеры на базе прорезных пружин отличаются простотой и надежностью, что крайне важно в организации эксплуатации бурильных труб, устранение поломок которых в рабочем процессе пробивки шурфов и скважин является весьма сложным и затратным делом, особенно при глубокой проходке. Моментомер нефтяников например, типа РММ-170 [2], представляет собой автономный глубинный механический регистратор, предназначенный для замера и записи момента, действующего в бурильных трубах, соосно которым устанавливается в любом их разъеме, в условиях турбинного и роторного бурения. После подъема на поверхность содержащей устройство трубной плети из его регистратора извлекается диаграммная фольга с записью изменения момента по величине во времени долбления. Запись осуществляется пером, жестко связанным с поворотной осью, движения которой также отслеживают изменения эксплуатационной осадки

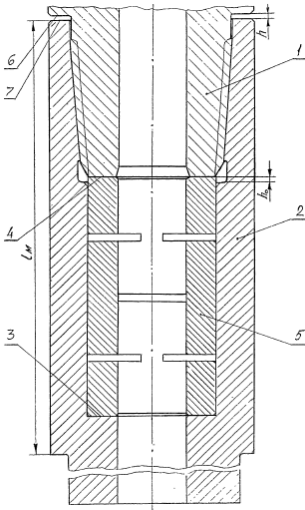


Рисунок 1 – Осевое сечение резьбового соединения бурильных труб перед затяжкой [4]

пружины, демпфирующей перемещения оси. Расшифровка моментограмм осуществляется по тарифовочным графикам. В условиях реального бурения опытная конструкция глубинного механического регистратора момента этого типа была успешно испытана в августе 1971 года на скважине 3438 Ново-Хазинской площади Нефтекамского управления буровых работ [3].

Повышенная нагрузочная способность и расчетная предсказуемость податливости прорезных пружин под данной нагрузкой позволяет использовать их осадку как эталон обеспечения заданного усилия затяжки ответственных резьбовых соединений конструкций с повышенными требованиями к эксплуатационной надежности, например в геологоразведочной и нефтегазовой проходке. Так, российский производитель бурового оборудования является патентообладателем изобретения [4]

резьбового соединения, состоящего (рисунок 1) из замыкающих стыкуемые концы двух труб ниппеля (поз. 1) одной из труб и охватывающей этот ниппель в резьбовом соединении с ним муфты (поз. 2) другой трубы, причем ступенчатая полость муфты содержит прорезную пружину (поз. 5), в исходном позиционировании (до осуществления рабочего резьбового соединения) выступающую над расчетным положением своего упорного в рабочем контакте с ниппелем торца на величину осадки (h_0) под расчетным (требуемым) усилием затяжки.

Широко известны применения прорезной пружины в гашении вибраций в устройствах и механизмах специализированного применения, работающих в различных условиях эксплуатационного нагружения, в том числе в нефтегазовой промышленности.

Так, прорезная пружина представляет механическую часть в конструкциях гидромеханических амортизаторов гашения низко- и высокочастотных колебаний бурильного инструмента при бурении глубоких скважин роторным способом [5]. Ее функция заключается в компенсации гидравлического удара, действующего при распрямлении жидкостной пружины на соосный с прорезной пружиной вал с рабочим долотом, т.е. процессы сжатия и распрямления гидравлической и механической частей амортизатора синергетически дополняют друг друга.

Как центратор-виброгаситель прорезная пружина востребована в динамических системах вращения с осевым нагружением.

Например, при добыче нефти с использованием винтовых насосов с поверхностным приводом при вращении колонны штанг внутри насосно-компрессорного трубопровода происходит контактный износ штанг и трубопровода. Кроме того, при вращении колонны штанг возникают крутильные колебания, которые отрицательно воздействуют на работу винтового насоса. С целью увеличения долговечности работы колонны штанг, насосно-компрессорного трубопровода и винтового насоса разработана конструкция специального центратора-виброгасителя, который состоит из металлического остова, выполненного из прорезной пружины, гуммированной упругим элементом [6].

Конструктивно-функционально подобный пружинный виброизолятор [7] содержит корпус с радиальными пазами, и пружины, расположенные в этих пазах вокруг объекта защиты (вертикальной стойки).

Прорезная пружина широко используется в приводах малых перемещений точного машиностроения, прецизионных автоматических системах слежения за механическим оборудованием и управления им, в том числе мехатронных устройствах синергетики узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, в особенности использующими физические явления электромагнетизма, магнитоstriction, обратного пьезоэффекта и др.

Схематичные примеры и описания работы электромагнитных приводов с использованием прорезной пружины приводятся в справочной литературе, например [8], рисунок 2.

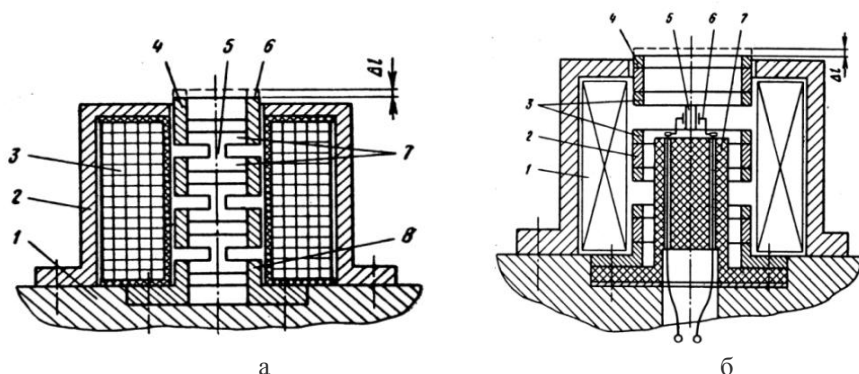


Рисунок 2 – Примеры приводов малых перемещений (а) и слежения за ними (б)

с использованием электромагнитно реактивных прорезных пружин [8]

Магнитопровод по рисунку 2, а образован смонтированными в корпусе 2 на фланце 1 катушкой 3 и якорем 4, представляющем собой прорезную пружину с кольцевыми элементами 7 из магнитомягкого материала и перемычками 5 из магнитодиэлектрика. Нижний конец 8 якоря 4 жестко закреплен на фланце 1, а верхний 6 – свободный и несколько выступает за торец корпуса 2. При подаче напряжения на катушку 3 кольца 7 намагничиваются и под действием электромагнитных сил сжимают перемычки 5 с результирующей осадкой Δl якоря 4, величина которой определяется управляющим напряжением. После отключения катушки 3 магнитное поле исчезает и прорезная пружина (якорь 4) под действием упругих сил восстанавливает свои исходные размеры. Привод характеризуется простотой конструкции и управления, быстродействием: время переходного процесса в основном определяется частотой собственных колебаний якоря 4.

Якорь 4 магнитопровода конструктивно аналогичной монтажной схемы по рисунку 2, б также представляет собой прорезную пружину, с кольцевыми элементами 3 из магнитомягкого материала и перемычками 2 и 5, часть из которых, выполняющих функцию датчиков обратной связи (5), выполнены из пьезокерамики, а остальные (2) – из магнитодиэлектрика. Держатель 7 токосъемника 6 расположен внутри пружины-якоря 4. Использование прямого пьезоэлектрического эффекта позволяет контролировать величину

осадки Δl якоря 4 под действием внешнего механического возмущения, воспринимаемого верхним торцевым концом якоря 4. Подача электрического напряжения на катушку 1 позволяет реализовывать комбинированную схему управляемого аналогично устройству по рисунку 2, а перемещения Δl с одновременным следящим контролем этого перемещения по описанному выше механизму использования прямого пьезоэлектрического эффекта.

Прорезные пружины применимы также как компенсаторы температурных перемещений в торцевых уплотнениях. Предпочтение им связано с более равномерной передачей нагрузки на уплотняющие кольца, чем при использовании витых пружин [9].

Компоновка [10] золотника пускового гидрораспределителя совместно с прорезной пружиной используется для обеспечения надежности функционирования содержащего золотник автоколебательного гидравлического привода. Подпружинивание производится со стороны одного из торцев золотника. Пружина установлена в одной из полостей управления этим гидрораспределителем и выполнена с регулируемым усилием предварительного поджатия.

Прорезные пружины работают в механизмах вибрационного уплотнения и формования бетонных смесей в производстве строительных конструкций. Их использование в этих механизмах обеспечивает практически бесшумную работу, позволяет формировать железобетонные изделия высокой прочности, морозостойчивости и водонепроницаемости с гладкой поверхностью [11].

Прорезная пружина в станкоинструментальных применениях

Благодаря надежной прогностке осевых перемещений под действием расчетной загрузки, демпфирующий эффект прорезной пружины используется в конструкциях приводов вращательных рабочих движений металлорежущих станков, например высокоскоростных шпиндельных механизмов (опыт Винницкого электротехнического завода [12]).

Однако основные применения прорезной пружины в станкоинструментальной технике и технологиях ближайшей полувекковой ретроспективы естественно ожидать в связи с известной распространенностью методов вибрационной обработки резанием [13].

Принцип упругой работы с повышенной нагрузочной способностью и непосредственно конструкция прорезной пружины используются [14] и рекомендуются к расширенному использованию [15] в качестве демпферов трения в многолезвийных расточных головках повышенной производительности с делением толщины среза.

В таких конструкциях (рисунок 3) прорезная пружина 7 исходно поджимается через механизм винтового регулирования 8 и через клин 6 обеспечивает передачу натяга, клиновый разжим и, с дополнительным подпружиниванием 5, центрирование получающим тем самым ограниченную

подвижность жестким направляющим 4 резцового блока 9 и головки с корпусом 3 и крышкой 1 в целом, по диаметру выполненным шлифованием в сборе с некоторым понижением в микрометрическом диапазоне относительно резцового блока 9, диаметральный размер которого принимается номинальным, причем допустимые границы этого понижения определяются ограничениями из условий трибологически допустимого риска врезочных контактов головки с поверхностью расточки (ограничение снизу – верхнее допустимое отклонение) и эффективного противодействия рискам увода и огранки обрабатываемой поверхности (ограничение сверху – нижнее допустимое отклонение). Точная установка резцового блока 4 и его закрепление осуществляются посредством установочного пальца 2 и винтов 10.

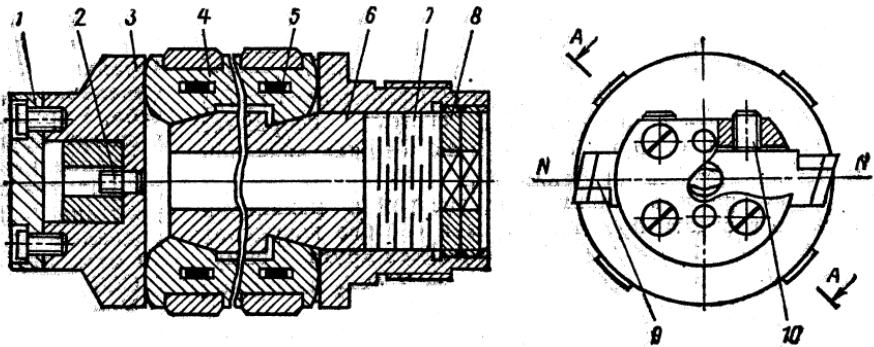


Рисунок 3 – Расточная головка с клиновым разжимом направляющих [14]

Прорезные пружины используются в качестве исполнительных устройств в составе одноинструментных резцедержателей, способных обеспечить колебательное движение резца в диапазоне частот до 200 Гц с амплитудой колебаний до 0,1 мм и тем самым вибрационное дробление стружки в механообрабатывающих применениях [16].

Прорезная пружина в колебательной цепи устройств для вибрационной обработки резанием, выполненная отдельно с поршнем [17], с целью повышенной демпферной защиты механизма может использоваться в последовательной комбинации с другими пружинами, более чувствительными. Так, в конструкции гидроимпульсного виброударного устройства для радиального и осевого виброточения [18] пружинная часть поршень-пружины выполнена как прорезная пружина, а силовое замыкание последней с объектом целевой вибронагрузки (резцом) осуществляется через пакет тарельчатых пружин на дне внутренней расточки корпуса устройства, одновременно связанным с державкой резцедержателя.

Аналогичную функцию смягчения вибрационных инициаций выполняет прорезная пружина, подобно [10] выполненная отдельно с золотником в устройстве того же назначения [19], где как пружина-золотник выступает также запорным элементом однокаскадного генератора импульсов давления с параметрическим принципом их генерирования, торцем золотниковой части через созданную на ней сферическую выточку опирающимся на сферический торец цилиндрического толкателя, другим торцем контактирующего с размещенным на дне расточки корпуса пакетом тарельчатых пружин, установленных на цилиндрической части оправки резца.

Для изготовления пружин станкоинструментального назначения, как и в других отраслевых применениях, используют высококачественные углеродистые стали У9А-У12А (ГОСТ 1435-74) и легированные кремнием, марганцем, никелем, хромом, ванадием, например 60С2А, 65Г, 50ХГА, 50ХФА и др. (ГОСТ 14959-69).

Опыт [16] конечно-элементного моделирования станкоинструментального применений прорезной пружины для обеспечения вибрационного резания показывает, что в оптимизации ее геометрии заключен значительно более высокий потенциал повышения работоспособности, нежели в выборе материала изготовления. Тем не менее показательны полученные [16] результаты для идентичных условий нагружения прорезных пружин из марганцовистой стали 65Г и кремний-хром-ванадиевой стали 60С2ХФА, согласно которым второй материал, несколько уступающий первому по пределу упругости ($1,91 \times 10^{11}$ Па против $2,15 \times 10^{11}$ Па), но заметно превосходящий его по пределу текучести ($7,85 \times 10^8$ Па против $14,7 \times 10^8$ Па), превосходит и в циклической прочности (выдерживает число циклов нагружения на 8,9 % большее).

Идея прорезного подпружинивания частично используется в обеспечивающих демпфирование лезвийной обработки различных устройствах закрепления резцов [20] или режущих пластин [21].

Устройство [20] для закрепления резцов включает корпус резцедержателя, опорный элемент и зажимные элементы. Опорные элементы, имеющие конструктивные демпферные выступы, размещены сверху и снизу резца и устройство дополнительно содержит демпферные жесткие пластины с пазами под демпферные выступы для создания верхнего и нижнего демпферных пакетов.

Сборный режущий инструмент [21] имеет державку, режущую пластину, которая закреплена зажимным винтом и прихватом, охватывающим внешнюю боковую поверхность режущей пластины, при этом режущая пластина расположена под углом к продольной оси державки. Прихват выполнен как одно целое с державкой и подпружинен в противоположном вектору осевой подачи режущей пластины направлении, а противоположная

прихвату внешняя боковая поверхность режущей пластины опирается на жесткий корпус державки.

Конструкторско-технологические перспективы прорезной пружины

Перспективы прорезной пружины в технике и технологиях следует рассматривать с позиций, во-первых, расширенного использования ее известных конструкций в известных отраслевых применениях; во-вторых, применимости известных конструкций в инновационной технике; в-третьих, инновационного развития самой конструкции с целью совершенствования функциональности и расширения возможностей применения.

По первому направлению рассмотрения перспективы прорезной пружины очевидны уже из приведенного выше обзора ее применений в ключевом обеспечении эффективной функциональности ответственной техники различного отраслевого назначения.

Позитивная прогностика применимости прорезной пружины в инновационной технике следует из очевидного неиссякающего внимания к ней в авиационной-космической отрасли, последнее столетие флагманской в развитии научно-технического прогресса современной цивилизации, в частности безальтернативно ответственной за ее безопасность перед вызовами угроз космогенных катастроф.

Это утверждение подтверждается перечнем учреждений работы авторов большинства исследований научно-технической проблематики и прикладной применимости прорезной пружины. Ведущее место среди них, как это следует из материалов первой части обзора, занимает интеллектуально-образовательный центр советской и российской космонавтики, каким является МВТУ (ныне МГТУ) им. Н. Э. Баумана, где получили высшее техническое образование и (или) впоследствии трудились авторы и редакторы основополагающих работ по прорезной пружине, вышедших из возглавляемой С. Д. Пономаревым [22, 23] научной школы прикладной механики, профессорствовали видные разработчики и организаторы космических исследований, приверженцы и популяризаторы прорезной пружины И. А. Биргер (ЦИАМ им. П. И. Баранова, заместитель начальника) [24, 25] и В. Н. Челомей (КБ 52 - НПО машиностроения, директор и генеральный конструктор) [11].

Конструкторские модификации технико-технологического концепта прорезной пружины продолжают появляться в ответ на индустриальные вызовы современного века. Характерным примером в этом ряду являются рассмотренные выше отечественные украинские разработки организации процессов производительного резания с вибрационной механикой исполнительных механизмов, конструктивно иллюстрируемые рисунками 3 и 4.

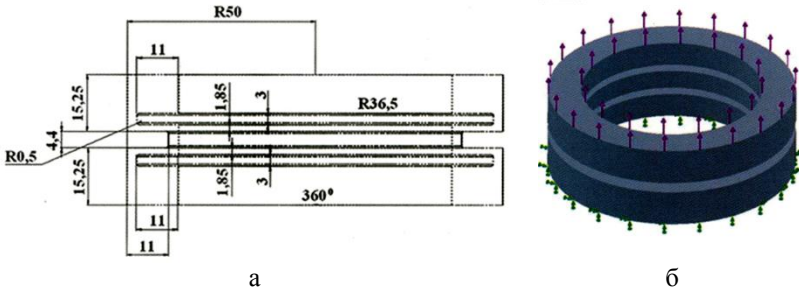


Рисунок 4 – Цилиндрическая кольцевая пружина с чередованием связанных колец двух различных наружных диаметров [16]

Потенциальную познавательную, творческую и прикладную неисчерпаемость технической идеологии прорезной пружины демонстрирует

опирающееся на более чем полувековой прототип [26] широкофункциональное современное изобретение [27] по сути нового класса прорезных пружин как жестких упругих элементов повышенной податливости, родившееся в стенах Всероссийского НИИ ядерной физики и обеспечивающее прогрессивную трансформацию расчетной схемы от двух опорного защемления криволинейной балки к рассмотрению консольной конструкции (рисунок 5).

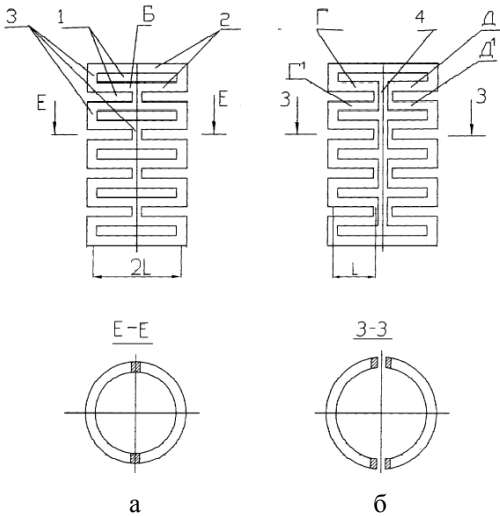


Рисунок 5 – Силовые пружины конвенциональной конструкции с силовой расчетной схемой двух опорных балок (а) и инновационной – консольной (б) [27]

и инновационной – консольной (б) [27] кольцами 2 и вертикальными перемычками 3 (рисунок 5, а) дополнительно наделена вертикальными прорезями 4 (рисунок 5, б), вдвое (до L , рисунок 5, б) понижающими вылет расчетных балок, но меняющими характер

Предложенная [27] конструкция наряду с обладанием привычными для прорезных пружин горизонтальными прорезями 1, дополнительно

расчетной схемы с рассмотрения двухопорной балки (*Б*, рисунок 5, а) на рассмотрение балок консольного типа (*Г*, *Д*, *Г1*, *Д1*, рисунок 5, б).

Очевидно, что проявление интереса к разработке и расчету инновационных конструкций прорезных пружин в учреждениях решения задач ядерной физики и атомного машиностроения государственного уровня [27] в эпоху становления современного, шестого технологического уклада [28] свидетельствует о научной и прикладной актуальности проблематики совершенствования рассматриваемого представленным обзором объекта и его применений.

Заключение

Выполненный обзор свидетельствует о технико-технологической актуальности, современной востребованности и перспективности дальнейших конструкторских и расчетных разработок прорезных пружин.

Они эффективно работают в различных ответственных устройствах общего и специального приборо- и машиностроения, эксплуатируемых в бурильных машинах нефтегазоразведки, производстве строительных материалов, робототехнике и других применениях.

Неизменный интерес к разработке и расчету инновационных конструкций прорезных пружин наблюдается в авиационно-космической отрасли и среде ее интеллектуальной поддержки высшей технической школой. В ретроспективе нынешнего века такой интерес проявился также в российских государственных учреждениях решения задач ядерной физики и атомного машиностроения.

Прорезные пружины различного конструктивного исполнения используются в вибрационных станкоинструментальных технологических устройствах высокопроизводительной лезвийной обработки резанием повышенной операционной надежности.

В то же время перспектива использования технико-технологических возможностей применения прорезных пружин в обеспечении высокопроизводительной алмазно-абразивной обработки и обслуживающих такую обработку высокоточных следящих устройствах остается открытой.

Список использованных источников: 1. *Веселков, Р. С.* Детали и механизмы роботов : основы расчета, конструирования и технологии производства : Учеб. пособие / *Р. С. Веселков, Т. Н. Гонтаровская, В. П. Гонтаровский* [и др.]; под ред. Б. Б. Самопкина. – Киев : Выща шк., 1990. – 343 с. 2. *Султанов, Б. З.* Управление устойчивостью и динамикой бурильной колонны / *Б. З. Султанов.* – М. : Недра, 1991. – 208с. 3. *Султанов, Б. З.* Промысловые испытания глубинного механического регистратора момента при турбинном и роторном бурении / *Б. З. Султанов, Ю. А. Подавалов* // Вопросы бурения скважин и добычи нефти и газа : Сб. науч. тр. – Уфа : Башкир. кн. изд-во, 1972. – Вып. 8. – С. 26-32. 4. *Лачинян, Л. А.* Резьбовое соединение бурильных труб : патент RU 2521123 С2 Российская Федерация : МПК (2006.01) E21B 17/042 / *Л. А. Лачинян, Н. Л. Лачинян*; патентообладатель: ОАО «Завод бурового оборудования». – № 2012 121505/03; заявл. 25.05.2012; опубл. 27.11.2013. Бюл. № 33. 5. *Султанов, Б. З.* Техника управления динамикой бурильного инструмента при проводке

- глубоких скважин / Б. З. Султанов, М. С. Габдрахимов, Р. Р. Сафиуллин, А. С. Галеев. – М. : Недра, 1997. – 165 с. 6. Сафаров, А. И. Центратор-вибросигнализатор для штанговой колонны винтового насоса / А. И. Сафаров, Р. Р. Сафиуллин // Материалы XXXVII-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Т. 1. – Уфа : Уфим. гос. нефтян. техн. ун-т, 1996. – С. 41. 7. Головачук, І. П. Пружинний віброізолятор: патент на корисну модель № 118294 Україна : МПК (2017.01) F16F 7/00 / І. П. Головачук; власник : Луцький національний технічний університет. – № у 2017 02839; заявл. 27.03.2017; опубл. 25.07.2017. Бюл. № 14. 8. Казаков, Л. А. Электромагнитные устройства РЭА : Справочник / Л. А. Казаков. – М. : Радио и связь, 1991. – 352 с. 9. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин : справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1979. – 702 с. 10. Гойдо, М. Е. Автоколебательный гидравлический привод : патент RU 2455536 С1 Российская Федерация : МПК (2006.01) F15B 21/12, F15B 11/15, F15B 13/16, F15B 3/00 / М. Е. Гойдо, В. В. Бодров, Р. М. Багаутдинов; патентообладатель: Бодров В. В. [г. Челябинск]. – № 2011 108191/06; заявл. 02.03.2011; опубл. 10.07.2012. Бюл. № 19. 11. Вибрации в технике : Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет : В. Н. Челомей (пред.). – Т. 4 : Вибрационные процессы и машины / Г. Г. Азбель, И. И. Блехман, И. И. Быховский [и др.]; под ред. Э. Э. Лавендела. – М. : Машиностроение, 1981. – 509 с. 12. Шнайдер, Г. З. Расчет величины перемещения прорезной пружины / Г. З. Шнайдер, А. С. Розенберг, А. З. Фурман [и др.] // Вестник машиностроения, 1983. – № 5. – С. 41-42. 13. Баранов, В. Н. Электрогидравлические и гидравлические вибрационные механизмы / В. Н. Баранов, Ю. Е. Захаров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977. – 326 с. 14. Григорьев, В. В. Расточная головка для глубоких отверстий / В. В. Григорьев, А. М. Емельянов, Е. Я. Самсонов // Станки и инструмент. – 1980. – № 9. – С. 22-23. 15. Уткин, Н. Ф. Обработка глубоких отверстий / Н. Ф. Уткин, Ю. И. Кижняев, С. К. Плужников [и др.]; под общ. ред. Н. Ф. Уткина. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 269 с. 16. Беляева, А. Ю. Влияние конструктивных параметров кольцевых пружин рессордержателей на их усталостную прочность в условиях вибрационного резания / А. Ю. Беляева // Мир техники и технологий. – 2013. – № 5. – С. 36-40. 17. Обертюх, Р. Р. Особливості розрахунку та проектування силових ланок гідроімпульсних пристроїв для вібраційного різання та поверхневого зміцнення, виконаних у вигляді комбінації поршня з прорізною пружиною та золотника з прорізною пружиною / Р. Р. Обертюх, А. В. Слабкий, О. В. Поліщук // Міжвуз. зб. "Наукові нотатки" [Луцьк]. – Вип. 42 (2013). – С. 193-201. 18. Обертюх, Р. Р. Гідроімпульсний віброударний пристрій для радіального та осевого віброточіння зі вбудованим генератором імпульсів тиску клапанного типу : патент на корисну модель № 72257 Україна : МПК (2006.01) B23B 1/00 / Р. Р. Обертюх, А. В. Слабкий, М. Р. Архитчук; власник : Вінницький національний технічний університет. – № у 2012 01534; заявл. 13.02.2012; опубл. 10.08.2012. Бюл. № 15. 19. Обертюх, Р. Р. Гідроімпульсний віброударний пристрій для радіального та осевого віброточіння зі вбудованим генератором імпульсів тиску : патент на корисну модель № 63958 Україна : МПК (2011.01) B23B 1/00 / Р. Р. Обертюх, А. В. Слабкий; власник : Вінницький національний технічний університет. – № у 2011 03794; заявл. 29.03.2011; опубл. 25.10.2011. Бюл. № 20. 20. Стецько, А. Є. Пристрій для закріплення різців : патент на корисну модель № 118193 Україна : МПК (2017.01) B23B 29/00 / А. Є. Стецько, В. А. Сторошук; власник : Українська академія друкарства. – № у 2017 01521; заявл. 17.02.2017; опубл. 25.07.2017. Бюл. № 14. 21. Руднік, Г. І. Збірний різальний інструмент : патент на корисну модель № 117826 Україна : МПК (2006.01) B23B 27/14 / Г. І. Руднік, С. А. Клименко, М. Ю. Копейкіна; власник : Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України. – № у 2017 00689; заявл. 25.01.2017; опубл. 10.07.2017. Бюл. № 13. 22. Князева, В. А. К расчету толстостенных прорезных пружин / В. А. Князева // Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение [Изд. МВТУ им. Н. Э. Баумана]. – 1975. – № 10. – С. 18-22. 23. Пономарев, С. Д. Расчет упругих элементов машин и приборов / С. Д. Пономарев, С. Л. Андреева. – М. : Машиностроение, 1980. – 326 с. 24. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин (справочное пособие) / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Р. М. Шнейдерович; под общ. ред. И. А. Биргера. – 2-е изд., исправл. и доп. – М. : Машиностроение, 1966. – 616 с. 25. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин. Справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр,

Г. Б. Иосилевич. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.
 26. Шершень, Л. Г. Пружина сжатия или растяжения : авт. свидетельство SU 206249 СССР : МПК F06f (Кл. 47а, 17) / Л. Г. Шершень, И. В. Олесин. – № 1061914/25-27; заявл. 15.03.1966; опубл. 02.12.1967. Бюл. № 24. 27. Федоров, В. Д. Прорезная пружина : патент RU 2400654 С1 Российская Федерация : МПК (2006.01) F16F 1/34 / В. Д. Федоров; патентообладатель: Гос. корпорация по атомной энергии «Росатом», ФГУП «Рос. федерал. ядерный центр – Всерос. НИИ ядерной физики» (РФ). – № 2012 114030/11; заявл. 13.04.2009; опубл. 27.09.2010. Бюл. № 27.
 28. Managing Nano-Bio-Info-Cogno Innivations : Converging Technologies in Society / Ed. by W. S. Bainbridge and M. C. Roco. – Dordrecht, Netherlands: Springer, 2005. – 398 p.

Bibliography (transliterated): 1. Veselkov, R. S., et al. *Detali i mekhanizmy robotov: osnovy rascheta, konstruirovaniya i tekhnologii proizvodstva*. Ed. by B. B. Samotokin. Kiev: Vyshcha shk., 1990, 343 p. Print. 2. Sultanov, B. Z. *Upravlenie ustojchivost'yu i dinamikoj buril'noj kolonny*. Moscow: Nedra, 1991, 208 p. Print. 3. Sultanov, B. Z., and Yu. A. Podavalov. "Promyslovye ispytaniya glubinnogo mekhanicheskogo registratora momenta pri turbinnom i rotornom burenii". *Voprosy bureniya skvazhin i dobychi nefi i gaza*. Ufa: Bashkir. kn. izd-vo, 1972, Iss. 8, 26-32. Print. 4. Lachinyan, L. A., and N. L. Lachinyan. *Rez'bovoe soedinenie buril'nyh trub: patent RU 2521123 C2 Rossijskaya Federaciya*. IPC, 2006.01 E21B 17/042. No. 2012 121505/03. Appl. 25.05.2012. Publish. 27.11.2013. Bull. No. 33. Print. 5. Cultanov, B. Z., et al. *Tekhnika upravleniya dinamikoj buril'nogo instrumenta pri provodke glubokih skvazhin*. Moscow: Nedra, 1997, 165 p. Print. 6. Safarov, A. I., and R. R. Safiullin. "Centrator-vibrogasitel' dlya shtangovoj kolonny vintovogo nasosa". *Materialy XXXVII-th nauch.-tekhn. konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh*. Ufa: Ufim. gos. neftyan. tekhn. un-t, 1996, Vol. 1: 41. Print. 7. Golovachuk, I. P. *Pruzhinnij vibrozolyator: patent na korisnu model' No. 118294 Ukraïna*. IPC 2017.01 F16F 7/00. No. u 2017 02839. Appl. 27.03.2017. Publish. 25.07.2017. Bull. No. 14. Print. 8. Kazakov, L. A. *Elektromagnitnye ustrojstva REA*. Moscow: Radio i svyaz', 1991, 352 p. Print. 9. Birger, I. A., B. F. Shorr, and G. B. Iosilevich. *Raschet na prochnost' detalej mashin*. Moscow: Mashinostroenie, 1979, 702 p. Print. 10. Gojdo, M. E. V. V. Bodrov, and R. M. Bagautdinov. *Avtokolebatel'nyj gidravlicheskiy privod: patent RU 2455536 C1 Rossijskaya Federaciya*. IPC, 2006.01 F15B 21/12, F15B 11/15, F15B 13/16, F15B 3/00. No. 2011 108191/06. Appl. 02.03.2011. Publish. 10.07.2012. Bull. No. 19. Print. 11. *Vibracii v tekhnike*. 6 vols. Head of Ed. Council V. N. Chelomej. Vol. 4: *Vibracionnye processy i mashiny*. Ed. by E. E. Lavendel. Moscow: Mashinostroenie, 1981, 509 p. Print. 12. Shnajder, G. Z., et al. "Raschet velichiny peremeshcheniya prereznoj pruzhiny". *Vestnik mashinostroeniya*. 1983, Iss. 5, 41-42. Print. 13. Baranov, V. N., and Yu. E. Zaharov. *Elektrohidravlicheskie i gidravlicheskie vibracionnye mekhanizmy*. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 326 p. Print. 14. Grigor'ev, V. V., and A. M. Emel'yanov, E. Ya. Samsonov. *Rastochnaya golovka dlya glubokih otverstij. Ctanki i instrument*. 1980, Iss. 9, 22-23. Print. 15. Utkin, N. F., et al. *Obrabotka glubokih otverstij*. Ed. by N. F. Utkin. Leningrad: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1988, 269 p. Print. 16. Belyaeva, A. Yu. "Vliyanie konstruktivnyh parametrov kol'cevych pruzhin rezcederzhatel'ev na ih ustalostnuyu prochnost' v usloviyah vibracionnogo rezaniya". *Mir tekhniki i tekhnologii*. 2013. Iss. 5, 36-40. Print. 17. Obertyuh, R. R., A. V. Slabkij, and O. V. Polishchuk. "Osoblivosti rozrahunku ta proektuvannya silovih lanok gidroimpul'snih pristroiv dlya vibracionnogo rizannya ta poverhnevoogo zmnicennyya, vikonanih u viglyadi kombinacii porshnya z prorznoyu pruzhinoyu ta zolotnika z prorznoyu pruzhinoyu". *Naukovi notatki*. – Iss. 42 (2013), 193-201. Print. 18. Obertyuh, R. R., A. V. Slabkij, and M. R. Arhipchuk. *Gidroimpul'snij vibroudarnij pristrrij dlya radial'nogo ta os'ovogo vibrotocinnyya zi vbudovanim generatorom impul'siv tisku klapannogo tipu: patent na korisnu model' No. 72257 Ukraïna*. IPC, 2006.01 V23V 1/00. No. u 2012 01534. Appl. 13.02.2012. Publish. 10.08.2012. Bull. No.15. Print. 19. Obertyuh, R. R., A. V. Slabkij. *Gidroimpul'snij vibroudarnij pristrrij dlya radial'nogo ta os'ovogo vibrotocinnyya zi vbudovanim generatorom impul'siv tisku: patent na korisnu model' No. 63958 Ukraïna*. IPC, 2011.01 V23V 1/00. No. u 2011 03794. Appl. 29.03.2011. Publish. 25.10.2011. Bull. No. 20. Print. 20. Ctec'ko, A. E. *Pristrrij dlya zakriplennyya rizciv: patent na korisnu model' No. 118193 Ukraïna*. IPC, 2017.01 V23V 29/00. No. u 2017 01521. Appl. 17.02.2017. Publish. 25.07.2017. Bull. No.14. Print. 21. Rudnik, G. I., S. A. Klimenko, M. Yu. Kopejkina.

Zbirnij rizal'nij instrument: patent na korisnu model' No. 117826 Ukraïna. IPC, 2006.01 V23V 27/14. No. u 2017 00689. Appl. 25.01.2017. Publish. 10.07.2017. Bull. No. 13. Print. **22.** *Knyazeva, V. A.* "K raschetu tolstostennyh proreznih pruzhin". *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie.* 1975, Iss. 10, 18-22. Print. **23.** *Ponomarev, S. D., and S. L. Andreeva.* *Raschet uprugih ehlementov mashin i priborov.* Moscow: Mashinostroenie, 1980, 326 p. Print. **24.** *Birger, I. A., B. F. Shorr, and R. M. Shnejderovich.* *Raschet na prochnost' detalej mashin.* Ed. by I. A. Birger. Moscow: Mashinostroenie, 1966. 616 p. Print. **25.** *Birger, I. A., B. F. Shorr, and G. B. Iosilevich.* *Raschet na prochnost' detalej mashin.* Moscow: Mashinostroenie, 1993, 640 p. Print. **26.** *Shershen', L. G., and I. V. Olesin.* *Pruzhina szhatiya ili rastyazheniya: avt. svidetel'stvo SU 206249 SSSR.* IPC, F06f. No. 1061914/25-27. Appl. 15.03.1966. Publish. 02.12.1967. Bull. No. 24. Print. **27.** *Fedorov, V. D.* *Proreznaya pruzhina: patent RU 2400654 CI Rossijskaya Federaciya.* IPC, 2006.01 F16F 1/34. No. 2012 114030/11. Appl. 13.04.2009. Publish. 27.09.2010. Bull. No. 27. Print. **28.** *Managing Nano-Bio-Info-Cogno Innivations: Converging Technologies in Society.* Ed. by W. S. Bainbridge and M. C. Roco. Dordrecht, Netherlands. Springer, 2005, 398 p. Print.

УДК 621.9.025

С.А. КЛИМЕНКО, д-р техн. наук,
М.Ю. КОПЕЙКИНА, канд. техн. наук,
А.О. ЧУМАК, Киев, Україна

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИНСТРУМЕНТОВ, ОСНАЩЕННЫХ КОМПОЗИТАМИ НА ОСНОВЕ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА

Розглянуто технологічні можливості різальних інструментів, оснащених полікристалічними надтвердими композитами на основі кубічного нітриду бору груп ВН, ВL, ВС, які виробляються Інститутом надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України. Наведено дані з порівняння їх працездатності, показано приклади та області ефективного застосування.

Ключові слова: різальний інструмент, кубічний нітрид бору

Рассмотрены технологические возможности режущих инструментов, оснащенных поликристаллическими сверхтвердыми композитами на основе кубического нитрида бора групп ВН, ВL, ВС, которые производятся Институтом сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины. Представлены данные по сравнению их работоспособности, показаны примеры и области эффективного применения.

Ключевые слова: режущий инструмент, кубический нитрид бора

The technological possibilities of cutting tools equipped with polycrystalline superhard composites based on cubic boron nitride of ВН, ВL, ВС groups are considered. The tools were made at the V.N. Bakul Institute of Superhard Materials of the NAS of Ukraine. The data are presented comparing their operability, examples and areas of effective application are shown.

Keywords: cutting tool, cubic boron nitride

Совершенствование технологий механической обработки изделий из современных конструкционных материалов связано с повышением производительности и снижением стоимости обработки за счет увеличения режимов резания, что, в свою очередь, обусловлено созданием новых режущих инструментов с применением высокоэффективных композитов инструментального назначения, таких как сверхтвердые материалы (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (сBN) [1].

Согласно стандарта ISO 1832-2012, композиты на основе сBN делятся на три группы – ВН, ВL, ВС.

Композиты группы ВН – с количеством сBN в диапазоне 70-95 об. %, являются существенно монофазными, но гетерогенными по своей структуре. К группе ВL относятся композиты с 45-65 об. % сBN. Матрица, дисперсность структуры которой соответствует субмикронному диапазону, мультифазна и

имеет сложный химический состав на основе керамических компонент с TiN, Ti(C, N), TiC, TaN, TiB₂, Si₃N₄, SiC, MAX-фаз. Группа BC объединяет композиты на основе cBN с защитными покрытиями.

Ниже показаны технологические возможности режущих инструментов, оснащенных поликристаллическими сверхтвёрдыми материалами на основе cBN, созданными в Институте сверхтвёрдых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Режущие инструменты, оснащенные композитами группы BH, позволяют эффективно обрабатывать изделия из различных чугунов, легированных сталей высокой твердости, твердых сплавов с содержанием WC > 15%, литых высокомарганцовистых сталей (например, 110Г13Л), деталей с напыленными покрытиями, в том числе самофлюсующимися, с аморфной и аморфно-кристаллической структурами и наплавленными покрытиями сплавами мартенситного класса высокой твердости (рис. 1).

Для эффективной обработки броней дробилок из литой стали 110Г13Л как по корке, так и после ее удаления, применяются инструменты, оснащенные пластиной RNUN 19070T из композита системы «cBN-AN, AlB₁₂» (содержание cBN 97%). При точении по корке со скоростями резания 70-100 м/мин, с подачами 0,3-0,4 мм/об и глубинами резания до 8-9 мм стойкость резцов составляет 120-180 мин.

Точение деталей, наплавленных сварочными, наплавочными, порошковым проволоками, спеченными лентами, напыленных с оплавлением покрытиями системы Ni-Cr-B-Si, напыленных порошковыми покрытиями с аморфной структурой, инструментами, оснащенными композитами систем «cBN-AN, AlB₁₂», «cBN-Si₃N₄» (содержание cBN 97%), производится со скоростями резания 60-110 м/мин как непосредственно по неровному поверхностному слою, так и в условиях финишной обработки.

В сравнении с керамическими резами, точение валков из отбеленного чугуна на вальцетокарных станках резами из ПСТМ системы «cBN-Si₃N₄» выполняется с производительностью большей до 4-5 раз, стойкостью инструмента большей в 3,0-3,5 раза. Обработка бочки валков и ручьев производится со скоростью резания 70-85 м/мин, с глубинами резания 0,2-1,5 мм при стойкости инструмента 120-130 мин.

Инструменты, оснащенные композитом системы «cBN-Si₃N₄», эффективно обрабатывают детали прокатной арматуры из твердого сплава BK15, BK25, BK30 со скоростями резания 15-20 м/мин.

Режущие инструменты, оснащенные композитами группы BL, позволяют проводить высокоэффективную чистовую лезвийную обработку изделий из сталей высокой твердости (62–64 HRC) (рис. 2).

Режущие инструменты из композитов систем «cBN-TiN», «cBN-TiC» (содержание cBN 50-55 об. %), позволяют выполнять чистовое точение закаленных сталей (ХВГ, ШХ15, 30ХГСА, 40Х, У8) при скоростях резания 180–270 м/мин, что обеспечивает производительность до 9000 мм³/мин.



a



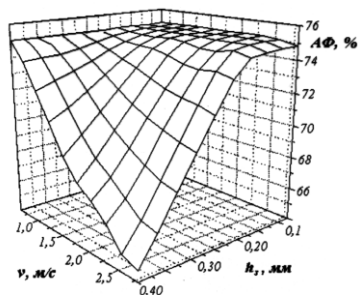
б



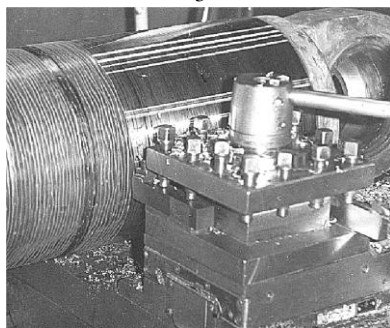
в



г



д



е

Рисунок 1 – Примеры применения инструментов, оснащенных поликристаллическими сверхтвёрдыми композитами группы *BH*, при обработке деталей: *a* – из чугунов; *б* – из сталей; *в* – из твёрдых сплавов; *г* – из литых высокомарганцовистых сталей; *д* – с напыленным покрытием (влияние условий обработки на степень аморфизации покрытия $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$); *е* – с наплавленным покрытием

По сравнению с обработкой инструментами из композитов группы *BH* скорость изнашивания инструментов в 1,5–5,0 раз ниже, что обуславливает получение обработанных изделий высокого качества при стойкости инструментов 30–45 мин. При скоростях резания более 250 м/мин наиболее перспективно применение режущих инструментов из композитов системы «CBN-TiC», которые по работоспособности соответствуют мировым аналогам (CBN100, SECO, Швеция).

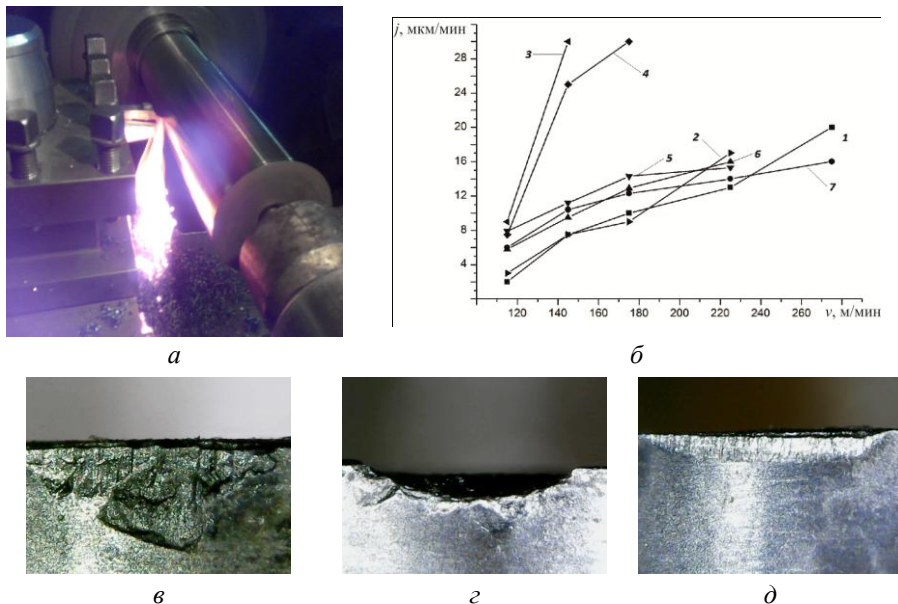


Рисунок 2 – Вид зоны обработки инструментом, оснащенным композитом группы *BL* (а), зависимость скорости изнашивания инструментов из ПСТМ на основе *cBN* от скорости резания при точении стали ШХ15 (62 HRC) (б): 1 – CBN100, 2 – WBN565, 3 – томал-10, 4 – борсинит, 5 – wBN (55 об. %)TiC, 6 – wBN (55 об. %)TiC, 7 – cBN (55 об. %)TiC; контактные участки задней поверхности инструментов из ПСТМ CBN100 (Seco) (в), *cBN* (55 об. %)TiC (г), *cBN*(75 об. %)TiC (д) после точения «с ударом» стали ХВГ (62–64 HRC) ($v = 250\text{--}265$ м/мин)

При высокоскоростном точении обеспечивается шероховатость обработанной поверхности $Ra\ 0,32\text{--}0,63$ ($Rz\ 4\text{--}6$), что в ряде случаев позволяет заменить на этапе чистовой обработки операцию шлифования, точением инструментами, оснащенными композитами на основе *cBN*.

Обработка изделий, изготовленных из Fe-C сплавов средней твердости (48–55 HRC), проводится инструментами с композитами группы *BL* со скоростями резания 300–360 м/мин при стойкости инструментов 25–35 мин.

Режущие инструменты, оснащенные композитами переходной группы BL-BH по интенсивности изнашивания при чистовом точении железоуглеродистых сплавов твердостью 60–64 HRC со скоростями резания 180–270 м/мин превышают на 25–30% интенсивность изнашивания инструментов с композитами группы *BL*, однако позволяют проводить обработку при динамических нагрузках (рис. 3).

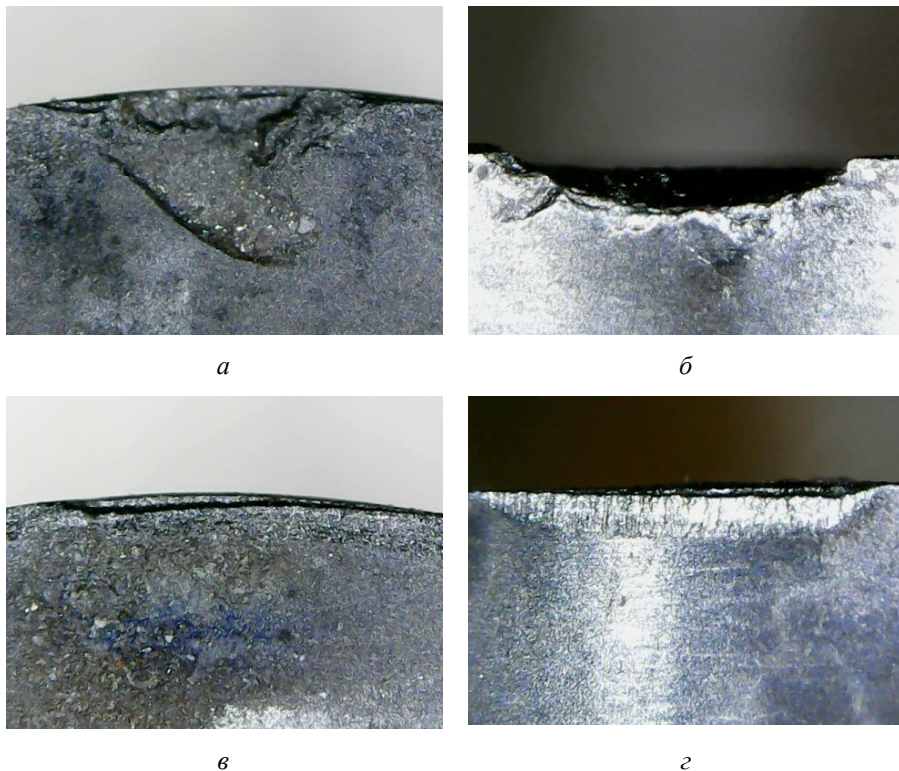


Рисунок 3 – Контактные участки передней (а, в) и задней (б, г) поверхностей инструментов, оснащенных композитами cBN-TiC 45% (а, б), cBN-TiC 25% (в, г), после точения с «ударом» стали ХВГ (62–64 HRC) ($v = 250$ м/мин)

В таких условиях обработка инструментами с композитом с низким содержанием cBN (50–55 об. %) сопровождается быстрым разрушением режущей кромки за счет микро- и макроскалывания. Точение режущими инструментами, оснащенными композитами с содержанием cBN 70–75 об. % проводится с подачами 0,2–0,3 мм/об при стойкости инструмента 25–30 мин, что существенно расширяет сферу применения композитов на основе cBN инструментального назначения.

Режущие инструменты, оснащенные композитами группы ВС, эффективно используются при обработке отмеченных выше конструкционных материалов (рис. 4, 5).

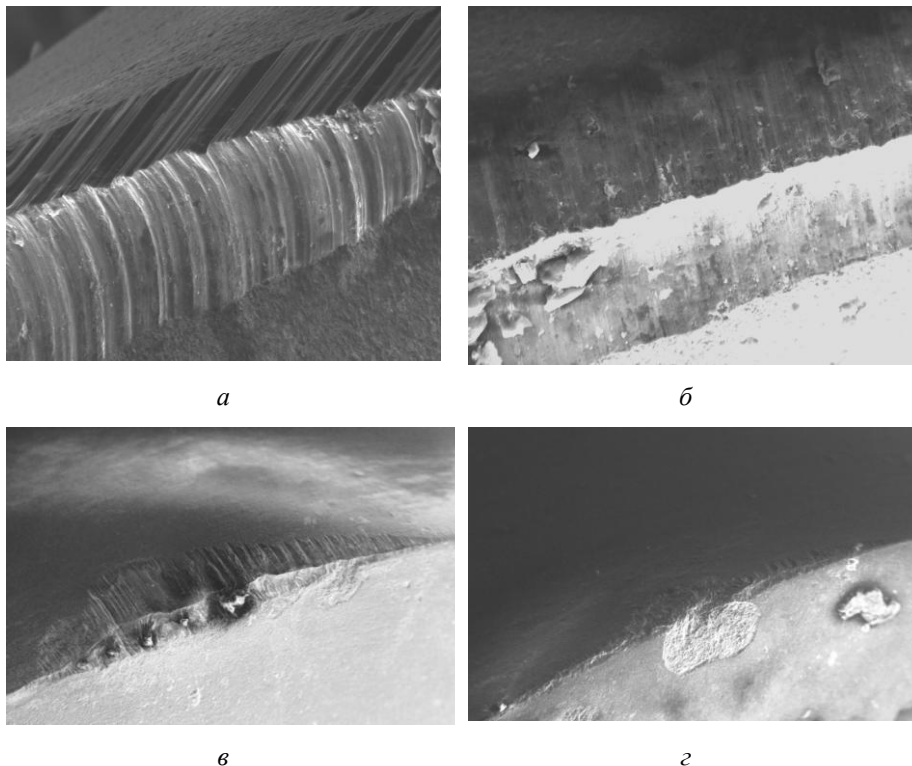


Рисунок 4 – Изношенные поверхности инструментов, оснащенных композитом группы *BH*: *а, в* – без покрытия; *б, г* – с покрытием $BN_{ам}$ (*а, б* – $v = 90$ м/мин; *в, г* – $v = 150$ м/мин)

При этом: – повышается надежность работы инструмента на этапе приработки, что связано с перераспределением и снижением напряжений, которые формируются в инструменте при его термобарическом нагружении; – увеличивается период стойкости инструментов за счет изменения механизма взаимодействия в зоне резания; – обеспечивается информационная функция, связанная с облегчением контроля величины износа инструмента.

Инструменты, оснащенные рассмотренными выше композитами на основе кубического нитрида бора, выпускаются в условиях опытно-промышленного производства ИСМ им. В.М. Бакуля НАН Украины. Наличие действующего отечественного производства инструментов из ПСТМ на основе cBN является базой для развития современных высокопроизводительных технологических процессов механической обработки, перспективных для инновационного развития промышленности.

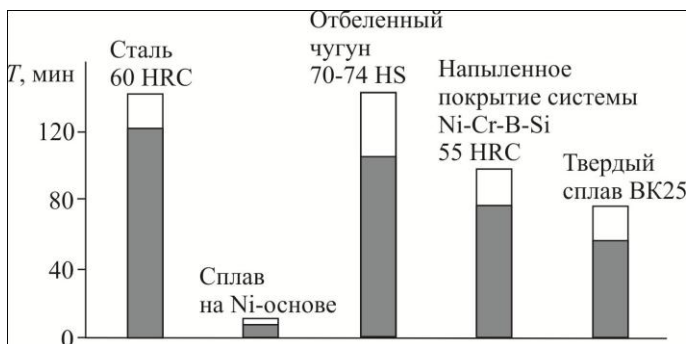


Рисунок 5 – Стойкость инструмента, оснащенного композитом группы BH:

■ – без покрытия; □ – с покрытием Al₂O₃-NbN

Список использованных источников: 1. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н.В. Новикова и С.А. Клименко. – М.: Машиностроение, 2014. – 608 с.

Bibliography (transliterated): 1. Instrumenty iz sverhtverdyh materialov / Pod red. N.V. Novikova i S.A. Klivenko. – М.: Mashinostroenie, 2014. – 608 s.

UDK 669.01+66.046

UDK 536:621.9

M. V. KUNITSYN,

A. V USOV, D. Tech. Sc., Odessa, Ukraine

TRIBOCORROSION RESEARCH OF NI- Al_2O_3 /TiO₂ COMPOSITE MATERIALS OBTAINED BY THE METHOD OF ELECTROCHEMICAL DEPOSITION

Метою даного дослідження було проведення електрохімічного осадження і трибоккорозійних досліджень композитних матеріалів на основі Ni- Al_2O_3 /TiO₂. За час досліджень було виконано електрохімічне осадження різних композитних матеріалів, при цьому проводилося порівняння з базовими матеріалами, такими як дуплексна сталь і електрохімічно осаджений нікель. Були охарактеризовані робочі частки з використанням методів лазерної дисперсії, а покриття характеризувалися в SEM з використанням різних детекторів (Зворотне розсіювання і Вторинні електрони), EDX (енергодисперсна рентгенівська спектроскопія) і FIB (сфокусований іонний пучок). На основі виконаних знімків в SEM була визначена залежність кількості частинок в покритті від концентрації частинок TiO₂ в розчині і часу електрохімічного осадження покриттів. Також були проведені трибологічне дослідження матеріалів Сталь/Ni/Ni-TiO₂, трибоккорозійне дослідження матеріалів Ni/Ni-TiO₂, порівняльна побудова профілів доріжок отриманих оптичним методом на основі конфокальної мікроскопії та визначення залежності висоти і ширини профілів від використовуваного матеріалу.

Ключові слова: композитні матеріали, трибологічні дослідження матеріалів

Целью данного исследования было проведение электрохимического осаждения и трибоккоррозионных исследований композитных материалов на основе Ni- Al_2O_3 /TiO₂. За время исследований было выполнено электрохимическое осаждение различных композитных материалов, при этом проводилось сравнение с базовыми материалами, такими как дуплексная сталь и электрохимически осадженный никель. Были охарактеризованы рабочие частицы с использованием методов лазерной дисперсии, а покрытия характеризовались в SEM с использованием различных детекторов (Обратное рассеяние и Вторичные электроны), EDX (энергодисперсная рентгеновская спектроскопия) и FIB (фокусированный ионный пучок). На основе выполненных снимков в SEM была определена зависимость количества частиц в покрытии от концентрации частиц TiO₂ в растворе и времени электрохимического осаждения покрытий. Также были проведены трибологические исследования материалов Сталь/Ni/Ni-TiO₂, трибоккоррозионные исследования материалов Ni/Ni-TiO₂, сравнительное построение профилей дорожек полученных оптическим методом на основе конфокальной микроскопии и определение зависимости высоты и ширины профилей от используемого материала.

Ключевые слова: композитные материалы, трибологические исследования материалов

The purpose of this study was to perform electrochemical deposition and tribocorrosion studies of composite materials based on Ni- Al_2O_3 /TiO₂. During the research, electrochemical deposition of various composite materials was carried out, while comparison was made with base materials such as duplex steel and electrochemically precipitated nickel. Working particles were characterized using laser dispersion methods and the deposits were characterized by SEM using different detectors (backscattered and secondary electrons), EDX (energy-dispersive x-ray spectroscopy) and FIB (focused ion beam). Based on the photographs taken in SEM, the dependence of the amount of particles in the coating on the concentration of TiO₂ particles in the solution and the time of electrochemical deposition of the coatings

was determined. Tribological studies of Steel/Ni/Ni-TiO₂ materials, tribocorrosion studies of Ni/Ni-TiO₂ materials, comparative construction of track profiles obtained by optical method based on confocal microscopy and determination of the height and width of profiles from the material used were also carried out.

Keywords: composite materials, tribological studies

The objective of the work was the preparation and modification of metallic surfaces for the experimental and theoretical tribocorrosion studies of composite materials based on Ni-Al₂O₃/TiO₂.

The main material in this study was duplex steel (duplex 2463). Duplex steel is a ferritic-austenitic stainless steel, which combines the most useful properties of ferritic and austenitic steels, also due to the high content of chromium and molybdenum, has very good resistance to pitting corrosion, crevice corrosion and corrosion resistance. Bi-directional microstructure of the steel provides high resistance to stress corrosion cracking and has high mechanical strength [1, 2].

For the experiment, five plates of duplex stainless steel with size of 100 mm by 40 mm by 3 mm were taken. Two plates were cut using a SiC disk into smaller ones with size 40 mm by 20 mm by 3 mm. Further, 40 by 20 by 3 mm plates were also cut using a SiC disk onto plates with a smaller dimension of 20 mm by 10 mm by 3 mm.

Initially, 40×20×3 samples were polished using SiC disks with grain sizes of 200, 400 and 1000. Finishing polishing was performed on a soft grinding wheel with a diamond atomizer. Later, this idea was rejected because there was no qualitative adhesion of the nickel coating on the samples. Subsequently, SiC grinding was carried out with disks with a grain size of 200.

After this, the samples were washed in running water, alcohol, distilled water and drying with compressed air.

From the stainless steel samples, the following parameters were taken: anode frequency impedance, cathode frequency impedance, cyclic voltammetry and open circuit potential [3].

The small and medium samples had different positions in the electrochemical deposition baths. For samples 40×20×3 (medium), the best conditions for the deposition of nickel are: the vertical position of the samples and a round platinum electrode located slightly lower and centered about the vertical axis of the sample. And for samples of 20×10×3 (small), the best conditions for the deposition of nickel are: the horizontal position of the samples and a special platinum electrode. Later it was decided to make the precipitation for medium samples in the horizontal position.

As is known, stainless steel is usually resistant to most corrosion effects, thanks to a thin oxide film on the surface. In this regard, it is quite difficult to obtain a coating with high-quality adhesion to the surface of the base metal. Accordingly, if this film is removed from the surface of the sample and held in such a state (while electrodeposition occurs), any galvanic metal can be applied to the stainless steel surface.

To remove the oxide film from the surface of stainless steel and to ensure good adhesion between the coating and the base metal, one of the chemical purification technologies described in the American Standard was applied [4].

The composition of the electrochemical bath and the parameters for the first treatment:

- Sulfuric acid (H_2SO_4) - 650 ml
- Water - to 1 l
- Potential (cathodic) - 10 V
- Temperature - room
- Time - 2 min

The composition of the electrochemical bath and the parameters for the second treatment:

- Nickel chloride ($NiCl$) - 240 g
- Hydrochloric acid (HCl) - 120 ml
- Water - to 1 l
- Temperature - room
- Time - 2 min
- Current density (cathodic) - 16,2 A/dm²

For all time, 4 solutions for the electrochemical deposition of composite materials have been made. All solutions are based on a standard solution for nickel plating:

- Nickel sulphate Ni_2SO_4 - 300 g/l
- Nickel chloride $NiCl_2$ - 50 g/l
- Boric acid H_3BO_3 - 40 g/l
- Formalin - 1,2 g/l
- Methanol - 1,4 g/l

In the first solution, there were no additional (ceramic) components. The second solution contained aluminum oxide Al_2O_3 - 10 g/l in addition to the main components of the solution for the electrochemical deposition of nickel. The third solution contained titanium dioxide TiO_2 - 20 g/l. Initially, in the fourth solution, concentration of the TiO_2 was 10 g/l. Based on the fourth solution, 3 small samples were obtained. After that, the concentration of TiO_2 was increased to 30 g/l.

An attempt was also made to deposit the composite coating on the basis of Al_2O_3 . During the investigation of the coating on the basis of Al_2O_3 in a microlaboratory, Al_2O_3 particles were not detected. A particle diameter of Al_2O_3 was also measured, which is 80 μm . In this connection, a decision was made to deposit TiO_2 particles instead of Al_2O_3 .

Electrochemical deposition of coatings was carried out using Autolab and the Nova program [5] with the following parameters:

- Mode - Galvanostatic;
- Current range - 100 mA;
- Bandwidth - High stability;
- Apply current - 0.035 A/dm²;
- Duration - 1800 s;
- Interval time - 0.1;

After each deposition, the thickness of the coating was calculated according to the Simpson's rule [6]:

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{h}{3} [f(x_0) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + 4f(x_3) + \dots + 2f(x_{2n-1}) + 4f(x_{2n-1}) + f(x_{2n})] + R_T =$$

$$= \frac{h}{3} \left[f(x_0) + \sum_{k=1}^n 4f(x_{2k-1}) + \sum_{k=1}^{n-1} 2f(x_{2k}) + f(x_{2n}) \right] + R_T = S_n + R_T$$

$$h = \frac{b-a}{2n}$$

$$x_k = a + \frac{K}{2n}(b-a)$$

$$R_T = \frac{-(b-a)h^4}{180} f^{(4)}(\xi), a < \xi < b$$

Depending on the surface area, deposition time and concentration of TiO₂ in solution, the thickness of coatings was from 0.023 mm to 0.069 mm.

After deposition of the coatings on the samples, the coatings were examined in SEM, the results are given below (Figure 1).

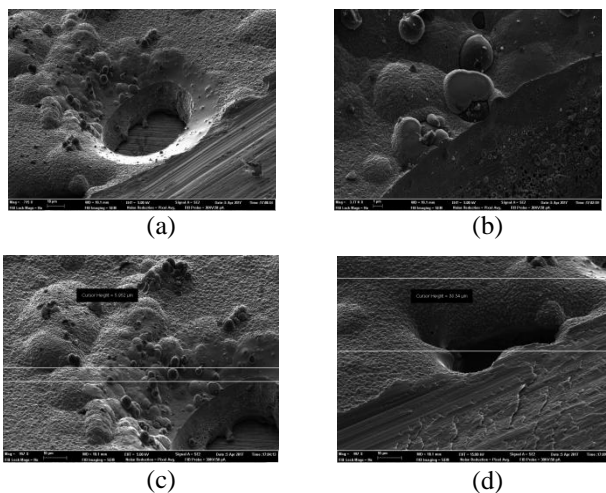


Figure 1 – Study of the coating in a scanning electron microscope: (a) violation of the coating, (b) TiO₂ particles, (c) TiO₂ particle diameter measurement, (d) thickness measurement of coatings

Figure 1(a) shows a violation of the coating based on Ni-TiO₂ due to the emerging hydrogen bubble. Also in the figure 1(a), a trace (bottom right corner) of the coating cut is visible to determine its thickness and internal structure. In the figure 1(b), the TiO₂ particles included in the Ni structure are clearly visible.

In the figure 1(c), the TiO_2 particle diameter is measured, which is $5.952 \mu\text{m}$. In the figure 1(d), the coating thickness is measured, which is $30.34 \mu\text{m}$, which corresponds to the calculations.

In addition to the above, was made a study of the particle size of titanium oxide by the optical method (from 2728 nm to 5706 nm). The results correspond to the studies in SEM (Figure 1(c)).

A direct dependence of the amount of TiO_2 particles in the coating on the concentration in solution was determined using the method of graphical particle counting using images taken in SEM through the ESB filter and the ImageJ program [7-9]. The results are shown in the histogram below (Figure 2). The histogram was plotted against the initial particle size, time of deposition and concentration of particles in solution.

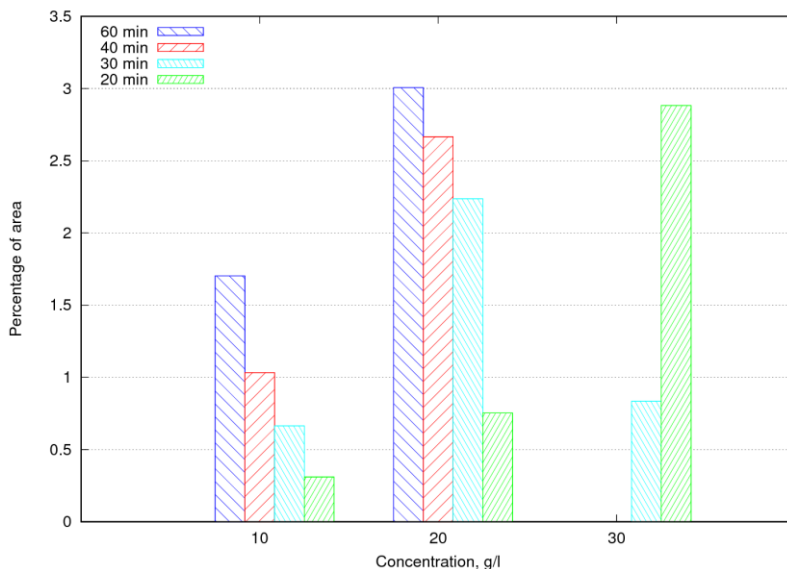


Figure 2 – The percentage of area occupied by the particles as a function of the deposition time and concentration of TiO_2 in the solution for the initial size of $0.50 \mu\text{m}$

As can be seen on the histogram, there is a marked dependence on the amount of particles in the coating from the concentration of TiO_2 in the solution and the deposition time: the larger the particle concentration of TiO_2 in the solution and the longer the deposition time, the more particles in the coating.

It should be noted that in the histogram with 30 g/l for the columns of 20 minutes and 30 minutes there is some ambiguity. To resolve this ambiguity,

additional studies with a solution of TiO_2 with a concentration of 30 g/l are necessary.

After that, tribological and tribocorrosive studies of the Steel/Ni/Ni- TiO_2 materials were performed using the reciprocating motion of a 3 mm ball of Al_2O_3 with different exposure time and load. The results are shown below. Tribological studies were carried out for Steel/Ni/Ni- TiO_2 materials with a load of 1 N and an exposure time of 10/20/30/40 minutes. After that, the construction of track profiles was carried out using a micro laboratory and an optical method based on confocal microscopy. Below are graphs for different materials and different time (Figures 3-6).

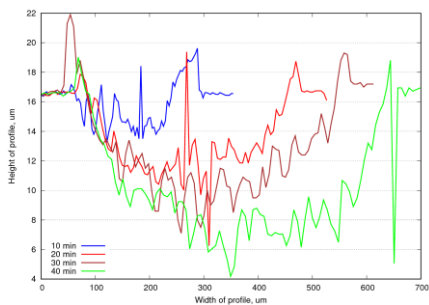


Figure 3 – Comparison of track profiles for duplex steel depending on the time of exposure

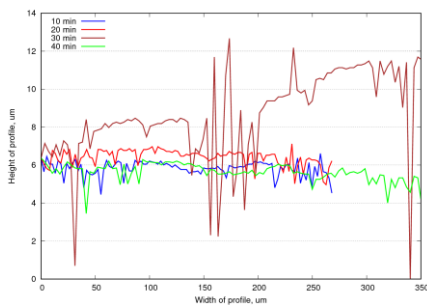


Figure 4 – Comparison of track profiles for nickel depending on the time of exposure

In the figure 3, the dependence of the shape of the track profile on the time of the load action is visible: with increasing exposure time, the height and width of the track profile increases rectilinearly.

Figure 4 shows that when comparing the profile of the tracks of nickel and duplex steel, the tracks are not clearly expressed regardless of the time of impact of the load. Also on the track with 30 minutes of load, there is some uncertainty, which is associated with a strong damage to the coating.

In the figure 5 it is noticeable that unlike the nickel tracks, the tracks Ni- TiO_2 are not very obvious and hard to identify

In the figure 6, there is a clear tendency to increase the height and width of the track profile for stainless steel, For Ni and Ni- TiO_2 do not change with increasing exposure time.

After tribological studies tribocorrosive studies were carried out for Ni and Ni- TiO_2 coatings. Tribocorrosion studies were carried out for 30 minutes at a load of 2/3/5/7 N in sulfuric acid H_2SO_4 0.5 M. Below are the comparative graphs of track profiles (Figures 7-9).

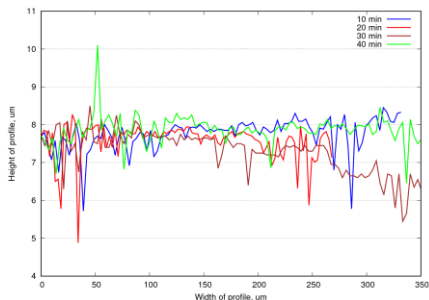


Figure 5 – Comparison of track profiles for Ni-TiO₂ depending on the time of exposure

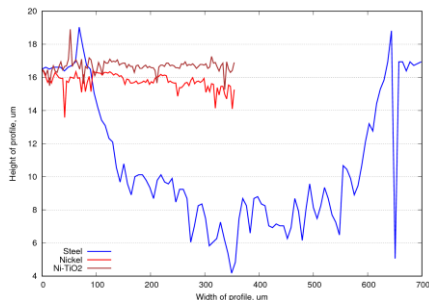


Figure 6 – Comparison of track profiles for Steel/Ni/Ni-TiO₂ in 40 minutes

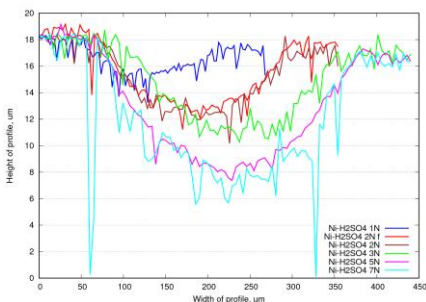


Figure 7 – Comparison of track profiles for nickel for 30 minutes with different loads

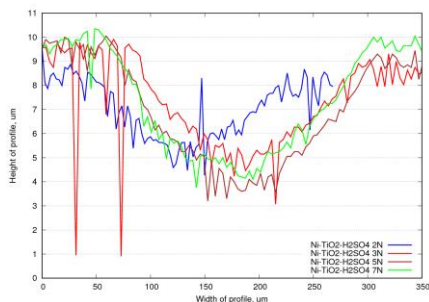


Figure 8 – Comparison of track profiles for Ni-TiO₂ for 30 minutes with different loads

In the figures 7 and 8, a relative construction of track profiles for Ni and Ni-TiO₂ coatings is performed. For Ni coating, it can be seen that the height and width of the track profile increases in direct proportion to the increase in load with an unchanged exposure time. At the same time, the track profile for Ni-TiO₂ coverage with increasing load and constant time does not change.

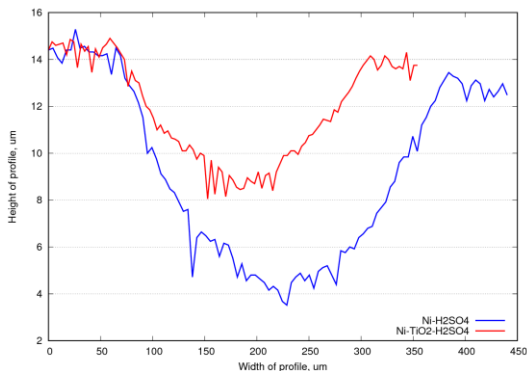


Figure 9 – Comparison of track profiles for Ni/Ni-TiO₂ coatings for 30 minutes and 5N load

Conclusions

During the period of research the following stages were performed. Samples were prepared for the electrochemical deposition of composite materials, which included cutting, grinding, polishing, and electrochemical cleaning before deposition. Four solutions were made for the electrochemical deposition of nickel and composite materials with the addition of additional ceramic elements - Al₂O₃ and TiO₂ in various concentrations. The precipitation itself was carried out directly on samples of duplex steel of various sizes, in different positions (vertical and horizontal) and with different particle concentrations of TiO₂ in solution. Studies of coatings in SEM have been carried out by various techniques, such as energy-dispersive x-ray spectroscopy, focused ion beam technique, transmission electron microscopy. The Al₂O₃ particle size was measured in a microlaboratory, as well as particles TiO₂ by a laser method. In addition, the dependence of the amount of particles in the coating was determined as a function of the concentration of TiO₂ in the solution by the graphic method using the ImageJ program. A tribological study of samples of various materials Steel/Ni/Ni-TiO₂ materials and comparative construction of track profiles was carried out. A tribocorrosive study of Ni/Ni-TiO₂ samples and a comparative construction of track profiles were also carried out.

The following main results can be singled out:

- there is a definite dependence of the amount of particles in the coating, depending on the concentration of TiO₂ particles in the solution and the time of electrochemical deposition of coatings. The greater the concentration and the longer the deposition time, the greater the amount of particles in the coating (for a concentration of 10 and 20 g/l). For a concentration of 30 g/l, additional studies are needed;

- after tribological studies of the materials, Ni-TiO₂, it was determined (confirmed) that Ni/Ni-TiO₂ coatings perform a protective function against mechanical abrasion under direct action on the base material;

- after tribocorrosive studies of Ni/Ni-TiO₂ materials, it was determined that for Ni coating, the height and width of the track profile is noticeably increased depending on the increase in load with constant exposure time. At the same time, the track profile for Ni-TiO₂ coverage with increasing load and constant time does not change. In this connection, it is possible to single out the positive influence of the TiO₂ particles in the coating, which increase the protective functions of the coating from mechanical abrasion, while the load for Ni-TiO₂ ceases to play such a significant role.

References: 1. Ross R. B. *Metallic materials specification handbook*. – Springer Science & Business Media, 2013. 2. Melilli A. S. *Handbook of Comparative World Steel Standards //ASTM, Handbook of Comparative World Steel Standards(USA)*, 1996., – 1996. – С. 533. 3. Sun Y., Flis-Kabulska I., Flis J. *Corrosion behaviour of sediment electro-codeposited Ni–Al₂O₃ composite coatings //Materials Chemistry and Physics*. – 2014. – Т. 145. – №. 3. – С. 476-483. 4. ASTM B254-92(2014), *Standard Practice for Preparation of and Electroplating on Stainless Steel*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org 5. NOVA 2.0 User Manual. Metrohm Autolab B.V. Kanaalweg 29/G 3526 KM, Utrecht, The Netherlands. 2.0.9.2105, September 2015 6. Raade, Lennart: *Mathematics handbook for science and engineering / Lennart Rade; Bertil Westergren*. 4. ed. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; London; Mailand; Paris; Singapur; Tokio: Springer, 1999 7. Rasband, W.S., *ImageJ*, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <https://imagej.nih.gov/ij/>, 1997-2016. 8. Schneider, C.A., Rasband, W.S., Eliceiri, K.W. "NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis". *Nature Methods* 9, 671-675, 2012. (This article is available [online](#).) 9. Abramoff, M.D., Magalhaes, P.J., Ram, S.J. "Image Processing with ImageJ". *Biophotonics International*, volume 11, issue 7, pp. 36-42, 2004. (This article is available [as a PDF](#).)

УДК 621.923.4

С.В. РЯБЧЕНКО, Киев, Украина

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ШЛИФОВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС АЛМАЗНО-АБРАЗИВНЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ

Розглянуто питання підвищення якості шліфування зубчастих коліс при використанні інструментів з електрокорунду та КНБ.

Ключові слова: зубчасті колеса, шліфування

Рассмотрены вопросы повышения качества шлифования зубчатых колес при использовании инструментов из электрокорунда и КНБ

Ключевые слова: зубчатые колеса, шлифование

The problems of increasing the grinding gears quality in using aluminum oxide and cBN tools are discussed.

Keywords: toothed wheels, gears

В машиностроении одним из путей реализации задачи повышения производительности обработки, является широкое применение новых абразивных и алмазных инструментов. Алмазно-абразивная обработка позволяет обеспечить требуемые точность и качество деталей при высокой производительности, а значит, обеспечить высокую надежность и долговечность машиностроительной продукции в процессе эксплуатации [1].

Для повышения точности и надежности изготовления таких деталей машиностроения, как зубчатые колеса находит широкое применение шлифование эвольвентного профиля зубьев.

Зубошлифование является одним из основных способов финишной обработки закаленных зубчатых колес. Шлифованием обеспечивается 3-6 степень точности зубчатых колес и шероховатость поверхности Ra 0,20-1,2 [2].

Шлифуют зубчатые колеса методами обката с непрерывным или периодическим делением и копирования с периодическим делением [3].

Метод копирования основан на воспроизведении рабочей поверхностью шлифовального круга впадины зубьев шлифуемого колеса (рис. 1, а). Фасонная форма рабочих поверхностей круга образуется в процессе правки. Этот способ зубошлифования в основном применяется для обработки цилиндрических колес с прямыми внешними зубьями с точностью не выше 6 степени, шероховатостью поверхности зуба в пределах Ra 0,32-1,25, диаметром до 1350 мм, модулем до 16 мм [4].

Метод обката предусматривает зацепление обрабатываемого колеса с зубом рейки, воспроизводимой поверхностями шлифовального круга.

Наиболее производителен метод непрерывного шлифования абразивным червяком (рис. 1, б). Образование профиля и правку витка абразивного червяка выполняют алмазными резцами или алмазными роликами. Шлифование зубьев абразивным червяком позволяет получать зубчатые колеса 5-6 степени точности с шероховатостью поверхности Ra 0,2-1,0 [4].

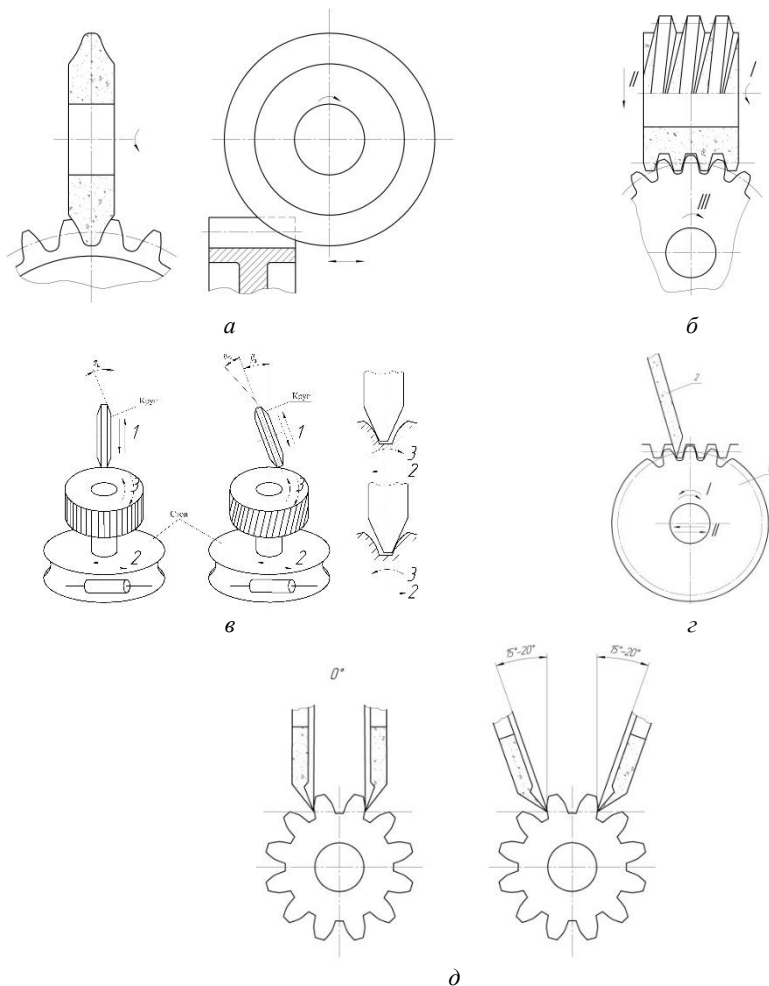


Рисунок 1 – Схемы шлифования зубчатых колес различными методами:

- а – копирования;
- б – обката абразивным червяком;
- в – обката конусным кругом;
- г – обката плоским кругом;
- д – обката двумя тарельчатыми кругами

Шлифование зубьев методом обката с периодическим делением осуществляется различными типами абразивных кругов. Одним конусным кругом, одним плоским кругом или двумя тарельчатыми кругами. При шлифовании конусным кругом, колесо или шлифовальная бабка совершает возвратно-поступательное движение в направлении, перпендикулярном к оси колеса (движение 1), и одновременно колесо поворачивается, соответственно скатыванию его по производящей рейке (движение 2) (рис. 1, в). Точность зубчатых колес, обработанных одним конусным кругом, достигает 5–6 степени, а шероховатость поверхности – Ra 0,2–1,0 [4].

Зубошлифование методом обката плоским кругом большого диаметра производится по схеме, показанной на рис. 1, з. В процессе обработки рабочая торцевая поверхность круга воспроизводит профиль одной боковой стороны зуба исходного контура рейки. При шлифовании плоским кругом достигается точность обработанных колес в пределах 3-4 степени точности и шероховатость поверхности зубьев – Ra 0,2-1,0 [4].

Зубошлифование методом обката двумя тарельчатыми кругами осуществляется по схеме, приведенной на рис. 1, д. Шлифовальные круги могут занимать различные положения относительно обрабатываемого колеса, а именно, параллельно между собой на расстоянии, равном длине общей нормали обрабатываемого колеса (0-градусный метод шлифования) или под различными углами (как правило, 15° или 20°) [3].

При шлифовании методом обката с периодическим делением двумя тарельчатыми кругами (на станках типа «MAAG») обеспечивается точность колес, начиная с 3 степени. Методы непрерывного шлифования червячным кругом (на станках типа «Reishauer») и обката с периодическим делением коническим шлифовальным кругом (на станках типа «Niles») уступают по точности шлифованию зубчатых колес двумя тарельчатыми кругами.

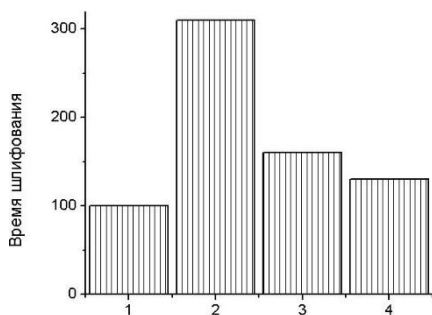


Рисунок 2 – Диаграмма сравнения основного времени обработки различными методами шлифования зубчатых колес ($m = 5$ мм; $z = 45$):

- 1 – тарельчатыми кругами; 2 – абразивным червячком;
3 – коническим кругом; 4 – профильным кругом

Диаграмма сравнения основного времени обработки различными методами шлифования зубчатых колес с модулем $m = 5$ мм и количеством зубьев $z = 45$ показаны на рис. 2. Наиболее высокая производительность достигается при непрерывном шлифовании методом обката абразивным червяком, наименее низкая – при шлифовании тарельчатыми кругами, при шлифовании профильным и коническим кругом получают промежуточное значение [2].

Анализируя результаты сравнения различных методов зубошлифования, следует отметить, что метод шлифования двумя тарельчатыми кругами, наиболее низко производителен. Такой метод предназначен для шлифования высокоточных колес (3-4 степени точности), что не обеспечивается другими методами. Исключением является метод копирования, однако обеспечение высокой точности сопряжено с большими затратами по подготовке шлифовального инструмента.

При современном развитии технологии возможно создание алмазно-абразивных инструментов со свойствами, необходимыми для обеспечения обработки деталей с наибольшей эффективностью при заданных требованиях к качеству и точности размеров. При разработке новых абразивных инструментов важная роль принадлежит абразивным материалам и связкам шлифовальных кругов [5].

К абразивным материалам относятся следующие искусственные материалы: Карбид бора – абразивный материал серовато-черного цвета, содержащий до 93% чистого карбида бора. По твердости (по Моосу 9,32) уступает только алмазу и КНБ. Карбид кремния – абразивный материал черного или зеленого цвета. Твердость по Моосу 9,1. Электрокорунд – абразивный материал, состоящий из корунда и небольшого количества примесей. Промышленность производит различные виды электрокорунда: нормальный, белый, хромистый, титанистый, циркониевый, монокорунд и различные смеси корундов. В последнее время появилась особая разновидность монокорунда – золь-геливый электрокорунд. Особенностью данного электрокорунда является микроскальвание зерен в процессе шлифования, что приближает его по качеству к зернам кубического нитрида бора (КНБ).

Сверхтвердые материалы - синтетический алмаз и кубический нитрид бора (КНБ). Алмаз представляет собой кристаллическую модификацию углерода. Кристаллическая решетка алмаза кубическая. Алмаз самый твердый абразивный материал. Кубический нитрид бора (КНБ) – искусственный материал, не встречающийся в природе. Он синтезируется из нитрида бора. При синтезе образуется кристаллическая решетка похожая на решетку алмаза. По твердости КНБ уступает только алмазу. Преимуществом КНБ перед алмазом как инструментальным материалом является его высокая теплостойкость и диффузионная устойчивость.

В производстве алмазно-абразивных кругов для шлифования зубчатых колес используются, в основном, различные разновидности электрокорундов и кубический нитрид бора. Из этих абразивных материалов изготавливаются тарельчатые круги для станков «MAAG», чашечные круги для станков «Gleason», конические круги для станков «Niles» и червячные круги для станков «Reishauer».

Из всего многообразия абразивных материалов, из которых изготавливаются шлифовальные круги для зубошлифования, особое место принадлежит электрокорунду, и в частности, хромистому корунду (рис. 3).



Рисунок 3 – Шлифовальные круги из хромистого корунда:
 а) тарельчатые круги для станка «MAAG»,
 б) конический круг для станка «Niles» - «ZSTZ»

Тарельчатые шлифовальные круги из хромистого электрокорунда использовались на АО «АЗОВОБЦЕМАШ» (г. Мариуполь) при шлифовании зубчатых колес на зубошлифовальном станке фирмы «MAAG» SD-32X. Шлифовались зубчатые колеса модуля $m = 5$ мм, число зубьев $z = 15$. Результаты испытаний показали, что при шлифовании зубчатых колес тарельчатыми кругами из хромистого электрокорунда диаметром 280 мм производительность обработки повышается в 1,2 раза по сравнению с кругами из белого электрокорунда при сохранении необходимой точности и качества обработки.

Аналогичные испытания были проведены в условиях ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс» (г. Запорожье). Шлифовались зубчатые колеса из закаленной стали ДИ-3А модуль $m = 1,5-6,0$ мм, число зубьев z от 24 до 80, ширина венца $B = 15-100$ мм. Шлифование зубчатых колес производилось на зубошлифовальном станке фирмы «MAAG» HSS-30. Испытывались шлифовальные круги диаметром 280 мм из смеси электрокорундов А89 60К 8V и хромистого электрокорунда А98 60 К 8 V. Результаты испытаний, показали, что производительность

обработки при шлифовании зубчатых колес тарельчатыми кругами из хромистого электрокорунда повышается в 1,2 раза по сравнению с кругами из смеси электрокорундов А89 при сохранении необходимой точности и качества обработанной поверхности эвольвентного профиля зуба.

Зубошлифование тарельчатыми кругами из хромистого электрокорунда было проведено на ПАО «Мотор-Сич» (г. Запорожье) при шлифовании высокоточных зубчатых колес из закаленной стали 12Х2Н4А модуля $m = 3$ мм, число зубьев $z = 31$, ширина венца $B = 45$ мм. При шлифовании зубчатых колес использовались тарельчатые круги диаметром 225 мм из хромистого электрокорунда А98 46 L 7 V в сравнении с кругами из белого электрокорунда. Результаты испытаний показали, что производительность обработки зубчатых колес тарельчатыми кругами из хромистого электрокорунда повышается в 1,3 раза по сравнению с кругами из белого электрокорунда, применяемого в данный момент на предприятии. При этом сохраняется необходимая точность эвольвентного профиля зуба и качество обработанной поверхности.

Шлифование зубчатых колес коническими кругами из хромистого электрокорунда было проведено на зубошлифовальном станке «Niles» - «ZSTZ» в условиях АО «АЗОВОБЩЕМАШ» (г. Мариуполь). Шлифовались зубчатые колеса модуль $m = 6$, число зубьев $z = 16$. Использовались конические круги из хромистого электрокорунда размером 400x32/4x127x60 характеристиками А98 60 Is(K) 9 V. Результаты испытаний, показали, что производительность обработки коническими кругами из хромистого электрокорунда повышается в 1,5 раза по сравнению с коническими кругами из белого электрокорунда.

Еще одним из направлений шлифования зубчатых колес является зубошлифование абразивным червяком на станках типа «Reishauer». Шлифовались зубчатые колеса мелкого модуля $m=1.4$ мм на предприятии «Каменский машиностроительный завод». Использовались шлифовальные круги из розового электрокорунда (А94) размером 350x63x160, характеристиками А94 150 Is 7 V. Розовый электрокорунд это смесь 70% белого электрокорунда (А99В) и 30% хромистого электрокорунда (А98). Результаты шлифования зубчатых колес показали повышение производительности обработки на 30% кругами из розового корунда по сравнению с кругами из белого электрокорунда.

Перспективным направлением использования высокопористых абразивных кругов, является шлифование зубчатых колес кругами диаметром до 400мм на станках «ZSTZ», «Gleason», «Reishauer» и «Orkut».

Успешно используются высокопористые абразивные круги при шлифовании зубчатых колес редукторов авиационных двигателей на станках «Gleason-Pfauter» на ПАО «Мотор-Сич» (г. Запорожье). Для шлифования используются высокопористые круги (структура 12) из электрокорунда

диаметрами до 350 мм. Круги показали высокую эффективность шлифования и полное отсутствие брака после обработки зубчатых колес.

В последнее время появились эффективные технологии изготовления высокопористого абразивного инструмента из современных монокристаллических электрокорундов. Нами проведено исследование процесса профильного шлифования зубчатых колес высокопористыми кругами из монокристаллических электрокорундов на ПАО «ХМЗ «Свет шахтера» (г. Харьков) на зубошлифовальном станке с ЧПУ модели HÖFLER RAPID 1250.

Результаты испытаний шлифовальных кругов из монокристаллического и золь-гелевого корунда показали их высокую эффективность по сравнению с кругами из белого электрокорунда. Эти круги обеспечивают уменьшение мощности шлифования и лучшие показатели по точности обработки [6].

Нами проведены испытания тарельчатых кругов из кубического нитрида бора при шлифовании высокоточных зубчатых колес [7]. Обработывались зубчатые колеса из цементированной и закаленной стали 14ХГСН2МА-Ш (56–62 HRC) (модуль $m = 4$ мм, число зубьев $z = 41$, ширина венца 55 мм, угол профиля $\alpha = 28^\circ$). Для шлифования использовали тарельчатые круги диаметром 275 мм из кубического нитрида бора, зернистостью 125/100 на керамической связке. Анализ результатов испытаний показал, что при шлифовании тарельчатыми кругами из КНБ на специальном станке получены зубчатые колеса, полностью удовлетворяющие требованиям заказчика по точности и качеству обработки. Производительность шлифования возрастает в 1,5–2 раза по сравнению с принятой на предприятии. Шероховатость поверхности зубчатого колеса Ra 0,63, превосходит требуемую заказчиком шероховатость (Ra 0,7–0,75).

Выводы

Важнейшим принципом при разработке новых алмазно-абразивных инструментов для зубошлифования принадлежит выбору надлежащих абразивных материалов и связки, а так же созданию нужной структуры шлифовального круга. Применяя особые рецептуры и специальные технологические методы производства кругов, мы создаем инструменты с особыми характеристиками, необходимыми для выполнения операций зубошлифования для различных отраслей машиностроения.

Список использованных источников: 1. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник / под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с. 2. Бенкин В.А. Прогрессивные методы финишной обработки цилиндрических зубчатых колес: обзор / В.А. Бенкин. – М.: НИИМаш, 1989. – 40 с. 3. Сильвестров Б.Н. Зубошлифовальные работы / Б.Н. Сильвестров. – М.: Высш. школа, 1985. – 272 с. 4. Гулида Э.Н. Технология отделочных операций зубообработки цилиндрических колес / Э.Н. Гулида. – Львов: Изд. об-ние "Вища школа", 1977. – 168 с. 5. Рябченко С.В., Серeda Г.В. Абразивные круги для шлифования зубчатых колес – «Оборудование и инструмент для профессионалов»: Международный информационно-

технический журнал. – Харьков: ИИД «ЦентрИнформ», 2011, № 4(138), – 80 с. **6.** Ларшин В.П., Лиценко Н.В., Рябченко С.В., Нежебовский В.В., Серeda Г.В. Профильное шлифование зубчатых колес высокопористыми абразивными кругами – «Оборудование и инструмент для профессионалов»: Международный информационно-технический журнал. – Харьков: ИИД «ЦентрИнформ», 2016, № 5(190), – 72 с. **7.** Рябченко С.В. Шлифование зубчатых колес тарельчатыми кругами из СТМ / С.В. Рябченко // Сверхтвердые материалы. – 2014. – № 6. – С. 81–89.

Bibliography (transliterated): **1.** Abrazivnaja i almaznaja obrabotka materialov: spravocnik / pod red. A.N. Reznikova. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 391 s. **2.** Benkin V.A. Progressivnye metody finishnoj obrabotki cilindricheskix zubchatykh koles: obzor / V.A. Benkin. – M.: NIIMash, 1989. – 40 s. **3.** Sil'vestrov B.N. Zubshlifoval'nye raboty / B.N. Sil'vestrov. – M.: Vyssh. shkola, 1985. – 272 s. **4.** Gulida Je.N. Tehnologija otdelochnykh operacij zuboobrabotki cilindricheskix koles / Je.N. Gulida. – L'vov: Izd. ob-nie "Vishha shkola", 1977. – 168 s. **5.** Rjabchenko S.V., Sereda G.V. Abrazivnye krugi dlja shlifovanija zubchatykh koles – «Oborudovanie i instrument dlja professionalov»: Mezhdunarodnyj informacionno-tehnicheskij zhurnal. – Har'kov: IID «CentrInform», 2011, № 4(138), – 80 s. **6.** Larshin V.P., Lishhenko N.V., Rjabchenko S.V., Nezebovskij V.V., Sereda G.V. Profil'noe shlifovanie zubchatykh koles vysokoporistymi abrazivnymi krugami – «Oborudovanie i instrument dlja professionalov»: Mezhdunarodnyj informacionno-tehnicheskij zhurnal. – Har'kov: IID «CentrInform», 2016, № 5(190), – 72 s. **7.** Rjabchenko S.V. Shlifovanie zubchatykh koles tarel'chatymi krugami iz STM / S.V. Rjabchenko // Sverhtverdye materialy. – 2014. – № 6. – S. 81-89.

УДК 621.923.91

Р.С. ТУРМАНИДЗЕ, д-р техн. наук,
В.И. БАЧАНАДЗЕ,
Г.З. ПОПХАДЗЕ, Тбилиси, Грузия

ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ УДОВЛЕТВОРЯЮЩИЕ СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ ИХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА ФОНЕ ПРИЗЫВОВ “ИНДУСТРИЯ 4.0”

In the presented work investigated the changes of power characteristics of deep drilling package of printed circuit board's hard metal micro drills depending on the drilling depth, cutting data and geometry of the drill. In particular studied the nature of changes in axial efforts and torque depending on the drilling depth drill with different inclinations of the spiral grooves using specially designed highly sensitive devices, enabling direct measurement method. Based on the analysis of the results of the study, changes in the geometry of existing standard drills. Proposed new construction of micro drills vary-angle spiral grooves in such a way that the angle is the maximum value at the top of the drill and uniformly decreases towards the end of the working parts. The drills are manufactured with different inclinations of the spiral grooves. Based on the experiments of them chosen more for its near standing power rates to the standard drill bit and its comparative test with a standard drill bit, bringing them up to the breakage, thanks to which the proven advantages of drills new design. Taking into account the results of the experiments proposed drill elongated structures to improve performance by increasing the processing drilling depth and accordingly the number of plates in the package of printed circuit boards.

Keywords: PCB, deep drilling, spiral drill, vary-angle spiral grooves, drill strength, drill wear, brittle fracture, cutting conditions, drill resistance

Введение и постановка задачи

Значительная часть современной техники, начиная от бытового и заканчивая космической аппаратурой, является совокупностью механических узлов, гидро и пневмо аппаратуры и микроэлектронных блоков или целых систем управления, то есть представляет собой сложную мехатронную систему.

Решение основных задач “Индустрия – 4.0” основано повышению надежности и работоспособности именно мехатронных систем, т.к. оный определяют уровень и степень автоматизации сложных технологических и управленческих операций.

В процессе производства таких систем нередко возникает необходимость обработки отверстий малых диаметров (около 1 мм и меньше), особенно на деталях гидро и пневмо аппаратуры. Что касается производства микроэлектронных узлов, в технологических процессах изготовления базовых деталей – печатных плат, значительную часть работ

приходит на операциях сверления огромного количества отверстий малого диаметра.

Для получения отверстий в печатных платах применяются разные методы, однако практика показала, что самым приемлемым методом, особенно при обработке многослойных печатных плат с последующей металлизации поверхностей отверстий, до сегодняшнего дня является метод сверления.

Сверление осуществляют микросверлами из твёрдого сплава, оптимальные значения геометрических параметров которых установлены многократными экспериментами и опытами соответствующих производств. В частности: оптимальный передний угол и соответственно угол наклона спиральной канавки составляет примерно 30° , а задний угол 18° . Их перетачивают через каждое 1000 отверстие и рассчитаны на 3-4 переточку.

Производство печатных плат это массовое производство, где с целью увеличения производительности осуществляется сверление пакета, составленной из несколько пластин, то есть имеет место глубокое сверление, где глубина сверления превышает к диаметру $8\div 10$ раз.

Простой дорогостоящего технологического оборудования, особенно в массовом производстве связаны со значительными экономическими потерями. В производстве печатных плат простой связан не только с предусмотренной заменой инструмента с целью их переточки, но и непредусмотренной, вызванной хрупкими разрушениями даже до первой переточки. Вероятность хрупкого разрушения значительно растет при глубоком сверлении пакета печатных плат. При этом зона разрушения находится в близости конца спиральной канавки.

Предусматривая массовость производственных процессов изготовления печатных плат, хотя бы незначительное повышение стойкости, в том числе хрупкой стойкости микросверл и соответственно повышение производительности процессов сверления, может дать значительный экономический эффект.

Основная часть

Исследовательские работы с целью повышения стойкости твердосплавных микросверл и производительности процесса глубокого сверления пакета печатных плат были проведены в лаборатории прецизионных микроинструментов департамента «Производственные технологий инженерной механики» Грузинского технического университета в тесном сотрудничестве со специалистами Магдебургского технического университета им. Отто Фон Гурике (Германия).

Исследования были начаты изучением характера изменения силовых показателей – крутящего момента и осевого усиления в зависимости от глубины и режимов сверления пакета печатных плат из стеклотекстолита.

Для измерения осевого усилия был изготовлен прибор на основе известных методов и существующих аналогов, измеряющим элементом, которого является система тензодатчиков, смонтированная на упругом корпусе (см. рис. 1).



Рисунок 1 – Прибор для измерения осевого усилия.

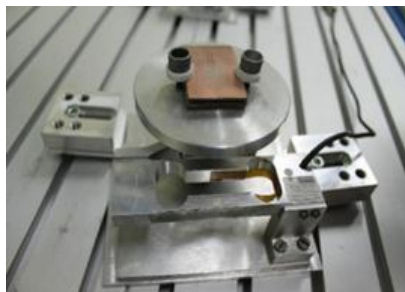


Рисунок 2 – Прибор для измерения крутящего момента.

Что касается измерения крутящего момента, то в нашем случае существующий косвенный метод, при котором измерение осуществляют с помощью измерения мощности процесса резания непригоден, так как при сверлений микросверлами показатели мощности настолько низкие что зафиксировать его изменения практически невозможно. Поэтому нужно использовать такой метод, который даст возможность измерить непосредственно крутящий момент, при этом с высокой точностью. С этой целью нами был спроектирован и изготовлен специальный прибор (см. рис. 2), в котором стол заготовок для сверления установлен на оси, имеющий возможность углового поворота. Со своей стороны, ось стола оснащен лиской, плоскость которого проходит на оси симметрии и определенным плечом воздействует на упругий измерительный элемент. В качестве измерительного элемента здесь тоже применяется смонтированная на упругом корпусе система тензодатчиков высокой точности измерения (чувствительность 0,1 грамм).

Эксперименты проводились сверлами из твердого сплава марки ВК60М диаметром $\varnothing 0,9$ мм длиной рабочей части $l = 10$ мм. Передний угол и соответственно угол наклона спиральной канавки $\omega = 30^\circ$, задний угол составлял 18° .

Осуществлялось сверление пакета печатных плат из стеклотекстолита толщиной 1,6 мм составленной из 5 пластин с общей толщиной 8 мм (см. рис.3).

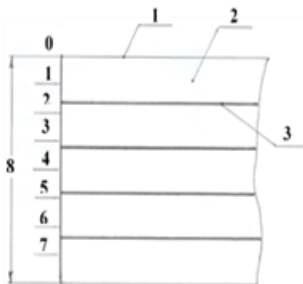


Рисунок 3 – Схема пакета печатных плат из 5 пластин.
1-медная фольга, 2- стеклотекстолит, 3-двойной слой медной фольги.

Сверление заготовок осуществлялось на разных режимах резания и через каждый 1мм глубины фиксировались показания измерительных приборов. Результаты экспериментов показаны на рис. 4 и 5.

Из этих результатов явно видно, что, как и ожидалось, силовые нагрузки с увеличением глубины прогрессивно растут. При этом если осевое усилие растет приблизительно в 1,5 раза, то величина крутящего момента увеличивается в 3÷4 раза.

Ставится вопрос, чем вызван такой рост силовых показателей? Условия резания у режущей кромки сверла с увеличением глубины не меняется. Единственной причиной этого может быть увеличение площади контакта абразивной стружки с поверхностью обработанного отверстия и возникшего от него сил трения.

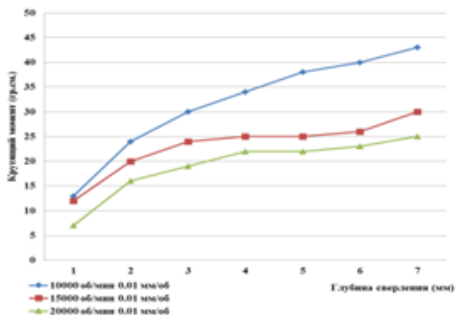


Рисунок 4 – График изменения крутящего момента для стандартных сверл $\omega = 30^0$.

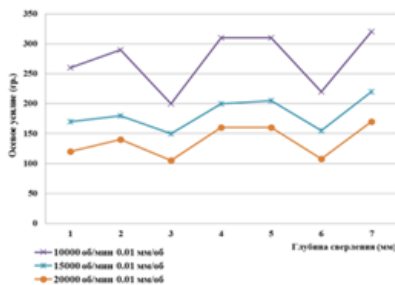


Рисунок 5 – График изменения осевого усилия для стандартных сверл $\omega = 30^0$.

Нужно отметить, что резкое падение осевого усилия на участках глубины 2-3 и 5-6 (см. рис. 5) обусловлено отсутствием на этих участках обрабатываемой заготовки (рис. 3) медного слоя.

Главным фактором повышения вероятности хрупкого разрушения режущего инструмента из этих двух силовых показателей может стать не рост осевого усилия, а более прогрессивное увеличение крутящего момента, так как прочностные показатели твердосплавных материалов на сжатие значительно превышают показателей на кручение.

Ускорение процесса стружкоудаления из зоны резания способствовало бы уменьшению сил трения и соответственно повышению надежности процесса сверления. Проблему удаления стружки при сверлении глубоких отверстий в разных случаях решают разными путями. Например, при сверлении сверлами крупных размеров это осуществляют методом вымывания с помощью смазочно-охлаждающей жидкости, который подается в отверстие через каналы, выполненной в самом теле сверла. В других случаях, когда размеры сверл не дают возможность подачи охлаждающей жидкости вышеуказанным методом, с целью удаления стружки применяют прерывистый метод сверления, при котором после просверления определенной глубины периодически осуществляется отвод сверла из отверстия быстрым ходом.

Применение этих методов в нашем случае неприемлем т.к. во первых дело имеем с микросверлами и при этом применение смазочно-охлаждающей жидкости в производстве печатных плат не допустимо. Нецелесообразен и метод прерывистого сверления, так как это привело-бы сильному падению производительности. При обработке глубоких отверстий микросверлами ускоряющим фактором удаления стружки может стать увеличение шага спиральной канавки, то есть уменьшение угла наклона, но это привело бы к ухудшению условий резания из-за уменьшения переднего угла сверла.

Если конструкцию сверла выполнить таким образом, что у вершины сохранить максимально эффективный для процесса резания передний угол и соответственно угол ω , а в направлении конца спиральной канавки постепенно уменьшить его значение, то есть спиральную канавку нарезать с переменным углом наклона и постепенно увеличить его шаг, это привело бы к ускорению процесса стружкоудаления и облегчению условий сверления.

На рис. 6 показана схема сверла с переменным углом наклона спиральной канавки, где угол наклона канавки у вершины сверла ω_0 , а в конце рабочей части ω_1 . Ширина канавки в сечении перпендикулярной канавки B_n по всей длине не меняется, но меняется в торцевом сечении и у

вершины составляет: $B_{T_0} = \frac{B_n}{\cos \omega_0}$, а в конце рабочей части $B_{T_1} = \frac{B_n}{\cos \omega_1}$.

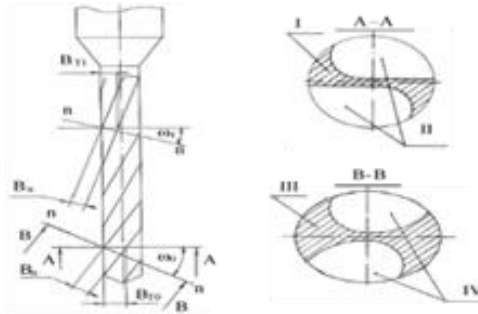


Рисунок 6 – Схема сверла с переменным углом наклона спиральной канавки,
 А-А – сечение сверла плоскости перпендикулярной его оси:

I - Полезная площадь сверла, II – профиль конавки.

В-В – сечение сверла в плоскости перпендикулярной спиральных канавок: III - Полезная площадь сверла, IV –профиль конавки

Меняется и полезное торцевое сечение сверла, значение которого у вершины:

$$S_o = \frac{\Pi d^2}{4} - \frac{2S_n}{\cos \alpha_0} \quad (1)$$

а в конце рабочей части:

$$S_1 = \frac{\Pi d^2}{4} - \frac{2S_n}{\cos \alpha_1} \quad (2)$$

где S_n – площадь канавки в перпендикулярном сечении, d–диаметр рабочей части сверла.

Если учтём, что $\alpha_0 > \alpha_1$, то получается, что в направлении конца рабочей части полезное сечение сверла усиливается. То есть такие сверла по сравнению с стандартными должны выдержать повышенные нагрузки.

Изготовление таких сверл связано с определенными сложностями. При изготовлении стандартных сверл с постоянным углом наклона спиральной канавки специальное приспособление осуществляет взаимное согласование двух движений – вращения заготовки сверла и его перемещение в осевом направлении таким образом, что на каждый оборот заготовка равномерно перемещается на один шаг спирали. В случае переменного шага осевая подача осуществляется с определенным ускорением, так, что обеспечивается равномерное уменьшение угла наклона спиральной канавки по всей длине нарезки. Из-за этого нам пришлось модернизировать оборудование и в кулачковом механизме подачи кулачок с Архимедовой спиралью сменить кулачком с профилем, изготовленный по нашим расчетам, исходящей из закона изменения угла наклона и соответственно шага спиральной канавки

сверла. Кроме этого, из-за переменного угла наклона спиральной канавки, при вышлифовке таких канавок обязательно нужно в процессе обработки менять ориентацию шлифовального круга относительно к оси заготовки сверла соответственно к изменению угла наклона канавки. Это можно осуществлять двумя способами: при неподвижной оси шлифовального шпинделя поворачивать ось шпинделя заготовки вокруг точки пересечения этих осей на величину угла $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_1$ (см. рис. 7), или неподвижным оставить ось шпинделя заготовки и поворачивать ось шлифовального шпинделя (см. рис. 8).

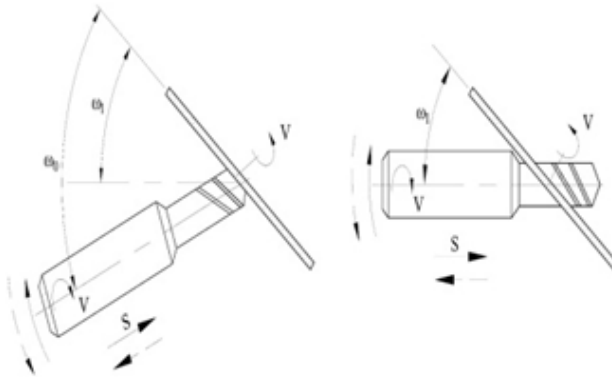


Рисунок 7 – Схема изменения ориентации осей заготовки сверла и шлифовального круга методом поворота оси шпинделя заготовки.

Исходя из конструктивных соображений нами предпочтение было отдано первому варианту (рис. 7) и в процессе модернизации оборудования был оснащён дополнительным механизмом поворота, обеспечивающим при нарезании спиральных канавок, поворот оси заготовки сверла относительно к плоскости вращения шлифовального круга на величину угла $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_1$. Текущая величина угла наклона определяется по формуле: $\omega_x = \omega_0 - \ell_x \cdot K_\omega$, где ω_x – текущая величина угла наклона, ω_0 – угол наклона у вершины сверла, ℓ_x – текущая координата длины режущей части сверла, K_ω – величина изменения угла наклона спиральной канавки на 1мм длины режущей части сверла.

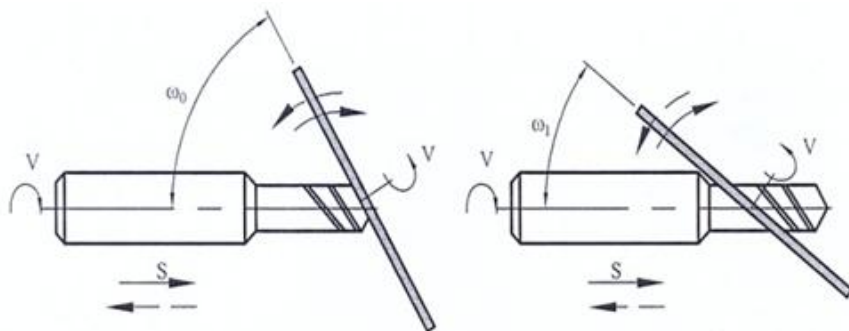


Рисунок 8 – Схема изменения ориентации осей заготовки сверла и шлифовального круга методом поворота оси шлифовального шпинделя.

Принципиальная схема такого модернизированного приспособления с рычажным механизмом поворота показана на рис. 9. Нужно отметить, что с целью достижения более высокой точности взамен рычажного механизма можно применять зубчато-реечную пару.

Приспособление для вишлифовки спиральных канавок в сторону заготовки сверла 1 установлено на оси вращения 2, смонтированной на столе заточного станка – 3Д642. При этом, ось поворота приспособления обязательно должен проходить на точку "О" пересечения оси заготовки сверла и вертикальной оси симметрии шлифовального круга 3, заправленной соответственно профилю спиральной канавки сверла. Другой конец приспособления опирается на круговое направляющее 4. Поворот осуществляется рычажным механизмом, опорный ось 5 которого неподвижно установлен на основании 6 приспособления. При осевом перемещении верхней салазки 7 и соответственно заготовки сверла, жестко связанный с ним палец 8 поворачивает правое плечо рычага 9. Левое плечо рычага связано с пальцем 10, неподвижно смонтированным на столе станка. Таким образом, поворот рычага вызывает поворот всей конструкции приспособления. При этом, элементы рычажного механизма рассчитаны так, что при осевой подаче заготовки сверла на величину длины винтовой нарезки приспособление поворачивается на величину изменения угла наклона спиральной канавки $\Delta_{\omega} = \omega_0 - \omega_1$.

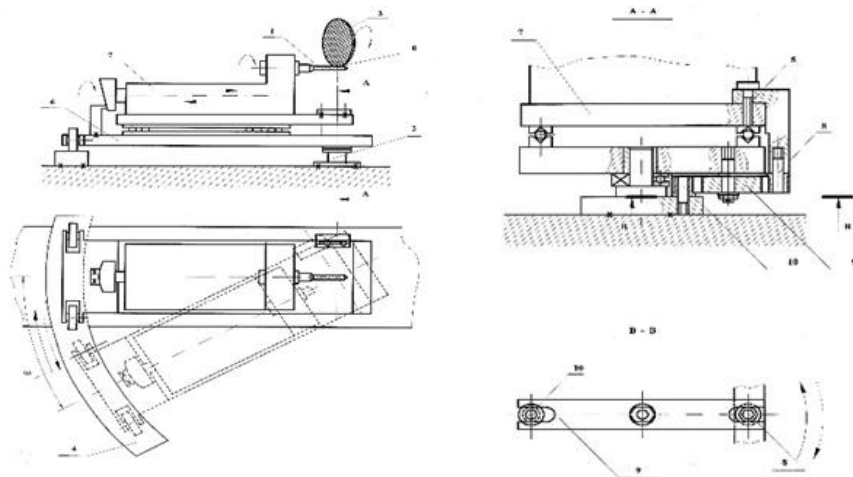


Рисунок 9 – Принципиальная схема механизма поворота оси заготовки сверла относительно к плоскости шлифовального круга при вышлифовке спиральной канавки с переменным углом наклона

Для этого рассчитывается расстояние между левым неподвижным пальцем и осью поворота приспособления по формуле:

$$R = l \cdot \frac{L_{\text{л}}}{L_{\text{п}}} \cdot \frac{360}{2\pi\Delta\omega} \quad (3)$$

где l – длина спиральной нарезки сверла, мм;

$L_{\text{л}}$ – длина левого плеча рычага;

$L_{\text{п}}$ – длина правого плеча рычага;

$\Delta\omega$ – величина изменения угла наклона спиральных канавок сверла.

В конструкции приспособления заложены так-же возможности регулировки величины осевой подачи заготовки и начального угла у вершины сверла ω_0 в определенном диапазоне. Благодаря этому нами были сконструированы и изготовлены опытные образцы сверл с разными диапазонами изменения угла наклона спиральной канавки: $\omega = 30-17^0$, $\omega = 35-20^0$, $\omega = 40-22^0$, и $\omega = 43-23^0$.

На всех этих свёрлах были проведены такие – же эксперименты, как на стандартных. Результаты экспериментов для свёрл $\omega = 30-17^0$ и $\omega = 35-20^0$ показаны на рис. 10-13.

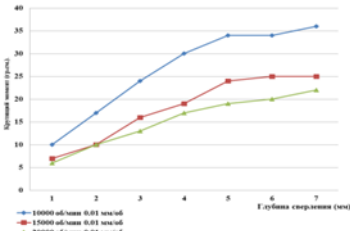


Рисунок 10 – График изменения крутящего момента для свёрл

$$\omega = 30-17^0$$

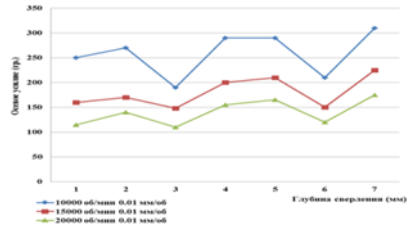


Рисунок 11 – График изменения осевого усилия для свёрл

$$\omega = 30-17^0$$

Анализ этих графиков показывает следующее: для свёрл $\omega = 30-17^0$ показатели осевого усилия почти не отличаются от стандартного сверла $\omega = 30$ что так, и ожидалось, так как у этих сверл одинаковый передний угол и соответственно, условия резания у режущей кромки. Что касается величин крутящего момента, они на сверле $\omega = 30-17^0$ в зависимости от режимов резания занижены на 12-16%-ов.

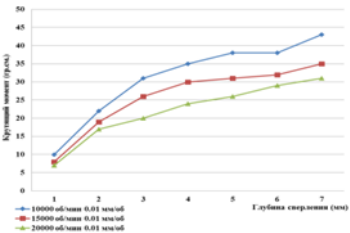


Рисунок 12 – График изменения крутящего момента для свёрл

$$\omega = 35-20^0$$

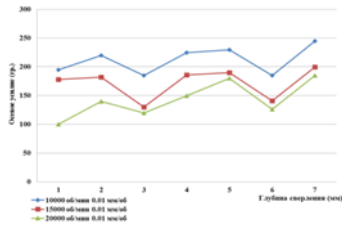


Рисунок 13 – График изменения осевого усилия для свёрл

$$\omega = 35-20^0$$

Для свёрл $\omega = 35-20^0$ показатели осевого усилия сравнительно занижены, так как передний угол увеличен на 5%-ов и этим облегчен процесс резания, но величина крутящего момента с увеличением глубины сверления растут более интенсивно и превышают показатели обоих предыдущих

образцов. Ясно, что занижение показателей крутящего момента на свёрлах $\omega = 30 - 17^0$ по сравнению со стандартными свёрлами $\omega = 30^0$ обусловлено постепенным увеличением шага спиральной канавки и соответственно уменьшением площади контакта образованной стружки со стенками обрабатываемого отверстия. Увеличение угла наклона и соответственно уменьшение шага спирали на свёрлах $\omega = 35 - 20^0$ опять вызывает обратный процесс – показатели крутящего момента интенсивно повышаются.

При сверлении свёрлами $\omega = 40 - 22^0$ и $\omega = 43 - 23^0$ эти силовые показатели относительно занижены (см. рис. 14-17), что объясняется улучшением условий резания из-за значительного ($5-8^0$ -ов) увеличения переднего угла у режущей кромки. Однако уменьшение угла заострения при дальнейшей эксплуатации вызывает увеличение интенсивности износа, и они без переточки доходят лишь до 600-800 отверстий.

Очевидно, что для получения более ясной картины нужно было продолжать сравнительные эксперименты между стандартными свёрлами $\omega = 30^0$ и свёрлами с переменным углом наклона спиральной канавки $\omega = 30 - 17^0$. Эксперименты были продолжены до поломки сверл. При этом через каждый 200 отверстий проверялись силовые показатели, которые с увеличением износа режущей кромки постепенно увеличиваются. После 1000 отверстий проверку осуществляли через каждый 100 отверстий, так как повышается вероятность поломки сверла. На протяжении всей серии экспериментов для обоих типов сверл почти одинаковыми оставались показатели износа режущей кромки и осевого усилия. Что касается крутящего момента, его значения на стандартных свёрлах $\omega = 30^0$ всегда превышали показателей свёрл с переменным углом наклона спиральной канавки $\omega = 30 - 17^0$.

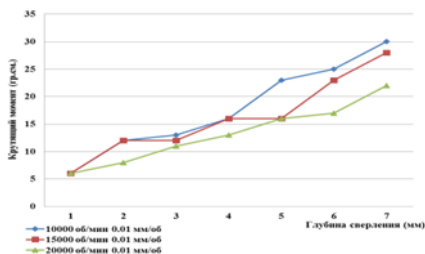


Рисунок 14 – График изменения крутящего момента для сверла $\omega = 40 - 22^0$

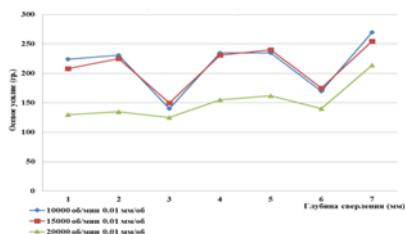


Рисунок 15 – График изменения осевого усилия для сверла $\omega = 40 - 22^0$

Статистика показала, что поломка стандартных свёрл $\omega = 30^{\circ}$ происходит от 1200 до 1300 отверстий, а свёрл с переменным углом $\omega = 30 - 17^{\circ}$ от – 1400 до – 1500.

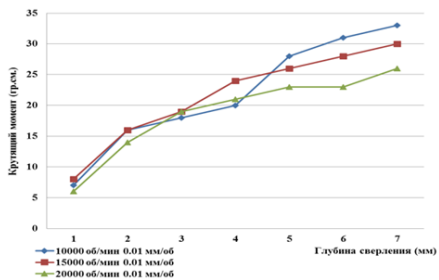


Рисунок 16 – График изменения крутящего момента для сверла $\omega = 43 - 23^{\circ}$

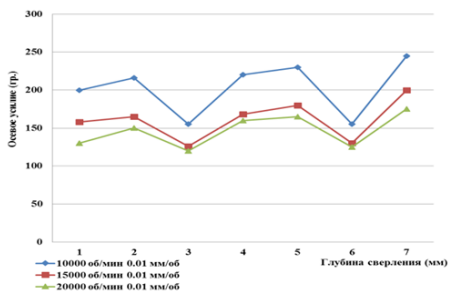


Рисунок 17 – График изменения осевого усилия для сверла $\omega = 43 - 23^{\circ}$

В настоящее время подобные эксперименты для выявления эффективности свёрл с изменяемым углом наклона спиральной канавки проводятся при обработке широко используемых в промышленности металлических материалов, как например титановые и алюминиевые сплавы и цветные металлы с разными физико – механическими свойствами.

В ближайшее время будут опубликованы результаты этих работ.

Выводы:

1. Твердосплавные микросверла с переменным углом наклона спиральной канавки при глубоком сверлении пакета печатных плат обеспечивают улучшение условий резания и интенсивности процесса стружкоудаления из обработанного отверстия, способствуя этим занижению сил трения и соответственно крутящего момента на оси сверла.
2. Выполнение спиральных канавок с постепенным занижением угла наклона ω – от вершины сверла в сторону конца рабочей части, обеспечивает усиление полезного сечения сверла, повышая этим надёжность на хрупкое разрушение.
3. Исходя из вышесказанного, появляется возможность изготовить сверла с удлинённой рабочей частью на 2–2,5 мм и в обрабатываемом пакете печатных плат добавить еще одну пластину, что даст возможность увеличить количество одновременно обрабатываемых плат и соответственно производительность процесса примерно на 20%.

Список использованных источников: 1. *R.Turmanidze, D.Adamia, M.Amiridze.* Influence of the Gradient Angle of the Screw Groove on Wear-Resistant of Fine-Sized Spiral Drills. Transactions of the Academy of Sciences of Georgia «Science and Technologies». Tbilisi, №10-12, 2002, 2 pages. 2. *Турманидзе Р.С., Адамия Д.Р., Амиридзе М.Н.* Исследование влияния угла наклона ω на величину износов режущих элементов мелкоразмерных сверл при обработке печатных плат. Международный научно-технический сборник «Резание и инструмент в технологических системах» Харьков, Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков, 2004 г. Выпуск №66. Стр. 3. *Б.Карпушевски, Л.Дюбнер, Р.С.Турманидзе и др.* Спиральные сверла малых размеров с переменным углом наклона стружечных канавок. Резание и инструмент в технологических системах международного научно-технического сборника. НТУ «ХПИ», Харьков, 2008г. 4. *Б.Карпушевски, Л.Дюбнер, Р.С.Турманидзе и др.* Erhöhung der standzeit und prozesssicherheit von mikrobohrern durch die entwicklung neuer werkzeuggeometrien. Сборник научных трудов «Современные технологии в машиностроении». Харьковский национ. техн. университет "Харьковский Политехнический Институт", Харьков, Украина. Выпуск 2. 2008г. стр.27-32. 5. *D.Adamia, V.Bachanadze, Z.Gviniashvili.* Peculiarities of formation of shavings grooves of spiral drill of alloy with variable inclination. Transport and Machinebuilding. Tbilisi, #3(15), 2009г. 6. *Р.С.Турманидзе, Д.Р.Адамия, З.М.Гвиниашвили.* Особенности изготовления и испытания мелкоразмерных твердосплавных спиральных сверл с переменным углом наклона стружечных канавок. Сборник трудов XVII международной научно-технической конференции «Машиностроение и Техносфера XXI века». Донецкий Национальный Технический Университет. Том 3. 13-18 сентября 2010г. с.181-184.

Bibliography (transliterated): 1. *R.Turmanidze, D.Adamia, M.Amiridze.* Influence of the Gradient Angle of the Screw Groove on Wear-Resistant of Fine-Sized Spiral Drills. Transactions of the Academy of Sciences of Georgia «Science and Technologies». Tbilisi, №10-12, 2002, 2 pages. 2. *Turmanidze R.S., Adamija D.R., Amiridze M.N.* Issledovanie vlijaniya ugla naklona ω na velichinu iznosov rezhushhih jelementov melkorazmernyh sverl pri obrabotke pechatnyh plat. Mezhdunarodnij nauchno-tehnicheskij sbornik «Rezanie i instrument v tehnologicheskix sistemah» Har'kov, Nacional'nyj tehniceskij universitet «HPi». g. Har'kov, 2004g. Vypusk №66. Str. 3. *B.Karpushevski, L.Djubner, R.S.Turmanidze i dr.* Spiral'nye sverla malyh razmerov s peremennym uglom naklona struzhechnyh kanavok. Rezanie i instrument v tehnologicheskix sistemah mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij sbornik. NTU «HPi», Har'kov, 2008g. 4. *B.Karpushevski, L.Djubner, R.S.Turmanidze i dr.* Erhöhung der standzeit und prozesssicherheit von mikrobohrern durch die entwicklung neuer werkzeuggeometrien. Sbornik nauchnyh trudov «Sovremennye tehnologii v mashinostroenii». Har'kovskij nacion. tehn. universitet "Har'kovskij Politehni-cheskij Institut", Har'kov, Ukraina. Vypusk 2. 2008g. str.27-32. 5. *D.Adamia, V.Bachanadze, Z.Gviniashvili.* Peculiarities of formation of shavings grooves of spiral drill of alloy with variable inclination. Transport and Machinebuilding. Tbilisi, #3(15), 2009g. 6. *R.S.Turmanidze, D.R.Adamija, Z.M.Gviniashvili.* Osobennosti izgotovlenija i ispytaniya melkorazmernyh tverdosplavnnyh spiral'nyh sverl s peremennym uglom naklona struzhechnyh kanavok. Sbornik trudov XVII mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Mashinostroenie i Tehnosfera XXI veka». Doneckij Nacional'nyj Tehniceskij Universitet. Tom 3. 13-18 sentjabrja 2010g. str.181-184.

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ

УДК 338.45:621

А.И. ВАСИЛЬЕВ, д-р екон. наук,
В.А. КОВАЛЬ, д-р техн. наук, Харьков, Украина

ОСОБЕННОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТОИМОСТИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И УСТАНОВОК

Розглянуто питання ціноутворення газотурбінних двигунів українського виробництва різної потужності для енергетики. Наведено методику прогнозування життєвого циклу виробу.

Ключові слова: газотурбінний двигун, потужність, компресор, турбіна, трудомісткість виготовлення, ціна

Рассмотрены вопросы ценообразования газотурбинных двигателей украинского производства разной мощности для энергетики. Показана методика прогнозирования стоимости жизненного цикла изделия.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, мощность, компрессор, турбина, трудоемкость изготовления, цена

The questions of pricing of gas turbine engines of Ukrainian production of different power for power engineering are considered. The technique of forecasting the cost of the product life cycle is shown.

Keywords: gas turbine engine, power, compressor, turbine, labor input, price

За последние 20 лет стационарные газотурбинные установки (ГТУ) заняли прочное место в энергетике ведущих и развивающихся стран мира с заметной долей газа и нефти в топливном балансе. На первом месте по применению ГТУ находится США, где установленная мощность в начале XXI столетия составляет более 60 млн. кВт. Всего в мире эксплуатируется более 13 тыс. энергетических ГТУ общей мощностью около 200 млн. кВт.

Газотурбостроение является одной из наиболее наукоемких и высокотехнологичных отраслей энергомашиностроения в любой развитой стране. Украина входит в десятку ведущих стран мира с полным циклом разработки и производства газотурбинных двигателей (ГТД) и установок для авиации, флота и наземного промышленного применения. К числу таких специализированных предприятий относятся ГП «Ивченко-Прогресс» и ПАО «Мотор Сич» (г. Запорожье), ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» (г. Николаев). В ряде случаев авиационные ГТД запорожского производства конвертированы в стационарные ГТУ различного назначения, например, в газотурбинные электростанции ПАЭС-2500, ЭГ-1000, АИ 336-10, АИ-318-25 и другие [1].

О достигнутом уровне развития и совершенства украинских

энергетических газовых турбин можно судить по данным рис.1, где показана зависимость КПД ГТУ от генерируемых мощностей машин.

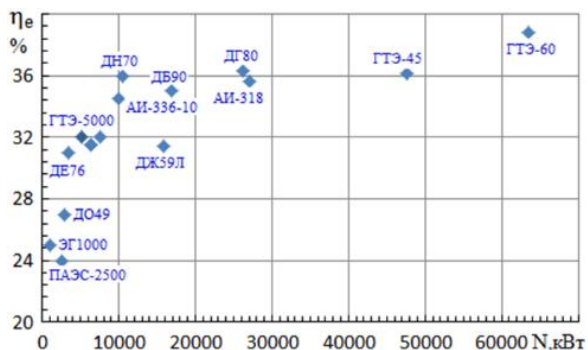


Рисунок 1 – Зависимость КПД энергетических ГТУ украинской разработки от мощности двигателя

Термодинамические параметры цикла π_k^* (степень повышения полного давления в компрессоре), T_g^* (температура газа перед турбиной) и мощность установки, влияющие на КПД машины, определяют и конструктивный облик ГТД/ГТУ. Величины π_k^* и T_g^* проектируемой ГТУ выбираются после технико-экономического анализа в зависимости от назначения установки и требований к ней с учетом важности показателя экономичности двигателя, его размера или массы.

Повышение температуры T_g^* возможно в случае применения жаропрочных/жаростойких сплавов и совершенствования системы охлаждения лопаток турбины. Платой за повышение температуры является высокая стоимость изготовления деталей турбины, продолжительный срок доводки и, как следствие, большие затраты на НИОКР. Часто высокий уровень T_g^* является причиной снижения показателей надежности и (или) увеличения затрат на техническое обслуживание. Иногда уменьшение температуры газа является единственным способом обеспечения требуемого ресурса двигателя. В этом случае для сохранения мощности ГТД необходимо обязательно проводить мероприятия по повышению КПД лопаточных машин, чтобы сохранить конкурентоспособность изделий на мировом рынке.

Рыночная цена изделия в основном зависит от стоимости его жизненного цикла (СЖЦ), которая определяется всеми затратами на создание и эксплуатацию ГТД в период назначенного ресурса машины [1], т.е. включает в себя:

– стоимость двигателя (затраты на НИОКР, строительные-монтажные и пусконаладочные работы при создании первого опытного образца, а также дальнейшие затраты в процессе серийного производства ГТД);

– затраты на топливо в течение всего периода эксплуатации;

– стоимость безвозвратных потерь масла и расхода материалов за жизненный цикл;

– затраты на ремонтно-техническое обслуживание (РТО) с учетом поставки запасных частей;

– прочие расходы (содержание обслуживающего персонала, плата за экологические проблемы, таможенные пошлины и др.).

Согласно приведенной выше структуре затрат при оценке СЖЦ однотипного изделия (без учета инфляции и дисконта) баланс затрат выражается соотношением $C_{жц} = C_{дв} + C_{топл} + C_{рто} + C_{пр}$. С учетом дисконта (приведения экономических показателей разных лет к сопоставимому во времени периоду) и инфляции эту формулу можно записать в виде

$$C_{жц} = C_{дв} + \sum_{t=1}^T k_d \cdot k_u^t \cdot (C_{дв} + C_{топл} + C_{рто} + C_{пр}), \quad (1)$$

где k_d – коэффициент дисконтирования, связанный с величиной дисконта E ($E = 0,08 \dots 0,12$) соотношением $k_d = 1/(1 + E)^t$; k_u – коэффициент инфляции ($k_u = 1,03 \dots 1,05$ для западной экономики, в отечественной практике $k_u = 1,08 \dots 1,10$); t – шаг (год) эксплуатации; T – продолжительность жизненного цикла двигателя (в годах), определяемая отношением $T = T_{нр}/T_{ср}$ ($T_{ср}$ – назначенный ресурс, $T_{ср}$ – среднегодовая наработка двигателя).

При эксплуатации по техническому состоянию продолжительность жизненного цикла T принимается равной сроку службы двигателя.

В процессе серийного изготовления ГТД производится массовая закупка материалов, специальных сплавов, агрегатов и пр. по ценам, в общем-то, не соответствующим конкурентной среде их производства, поскольку в ряде отраслей еще существуют монополистические признаки. Это отражается на высоком уровне цен покупных материалов и комплектующих изделий. Заработная плата основных рабочих в данный период определяется трудоемкостью изготовления двигателей и стоимостью нормо-часа. Трудоемкость изготовления ГТД в опытном производстве ранее обычно составляла 2,5...3-кратную трудоемкость первого серийного образца. Однако в настоящее время в связи с совмещением технологической подготовки серийного производства стало возможным значительно снизить трудоемкость изделия уже в опытном производстве. Как правило, с переходом на серийное производство представляется возможным значительно уменьшить

трудозатраты. Это может быть связано с рядом обстоятельств, например с упрощением каких-либо конструкций узлов и других мероприятий. Например, в процессе передачи ГТД Д049, разработки ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», для серийного производства на одно из предприятий отрасли возникла необходимость усовершенствования узла поворота направляющих лопаток первой группы ступеней осевой части осецентрибежного компрессора (рис. 2, а).

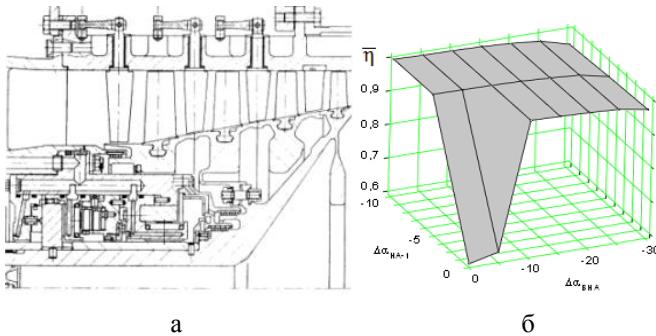


Рисунок 2 – Исходная конструкция узла первых осевых ступеней осецентрибежного компрессора ГТД Д049 (а) и влияние угла поворота ВНА и НА-1 на КПД первых двух ступеней (б)

В исходном варианте предусматривалось регулирование компрессора поворотом первых трех лопаточных аппаратов (ВНА, НА-1 и НА-2). Однако численные исследования [2] показали, что указанное регулирование машины является достаточно «глубоким» и в некоторых случаях может быть неоправданно перестраховочным. С этой целью выполнен параметрический анализ влияния различных углов установки трех указанных регулируемых аппаратов на КПД двух первых ступеней компрессора. Предусмотрено исключение регулирования второго направляющего аппарата (НА-2).

На рис.2,б показаны графики изменения относительного КПД двухступенчатого компрессора $\bar{\eta} = \eta/\eta_p$ в зависимости от угла установки ВНА $\Delta\alpha_{ВНА}$ на режиме работы $n = 11060$ об/мин. Здесь величина η_p соответствует КПД двухступенчатого компрессора на расчетном режиме $n = 14000$ об/мин. При этом полагалось, что угол установки НА-1 изменялся в диапазоне значений $\Delta\alpha_{НА-1} = -10^\circ, -5^\circ$ и 0° , а второй направляющий аппарат не регулировался ($\Delta\alpha_{НА-2} = 0^\circ$).

Из рис. 2, б следует, что в случае регулировании компрессора только за счет поворота ВНА (перекладка НА-1 и НА-2 отсутствует) КПД двухступенчатого блока уменьшается до уровня $\bar{\eta} = 0,65$ при $\Delta\alpha_{ВНА} = 0^\circ$, а при $\Delta\alpha_{ВНА} = -30^\circ$ – снижается на 3%. Анализ результатов исследования

свидетельствует о существенной роли НА-1 в регулировании машины в плане увеличения его КПД. Устранение поворотного аппарата НА-2 приводит к упрощению конструкции при условии сохранения достаточно высокого уровня КПД ($\bar{\eta} = 0,985\dots 0,99$) и запасов газодинамической устойчивости ($\Delta K_{y \min} = 11\%$) [3].

Устранение регулирования НА-2, расположенного уже в области повышенного давления, приведет к снижению утечек воздуха из проточной части машины, что благоприятно скажется на КПД всего компрессора.

Данное мероприятие наряду с другими конструктивными изменениями в конечном итоге позволяет значительно снизить трудоемкость серийного изделия Д049 (рис.3,а), что наглядно демонстрирует графическая зависимость \bar{T} от периода выпуска серийной продукции (в годах t), показанная на рис.3,б. Здесь $\bar{T} = T_1/T_{\min}$ – относительная трудоемкость, как отношение трудоемкости ГТД в первый год его выпуска к трудоемкости уже стабилизированного производства.

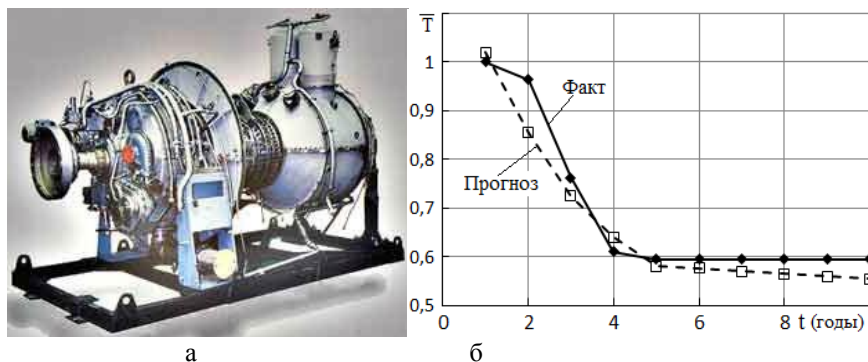


Рисунок 3 – Общий вид ГТД Д049 (а) и зависимость относительной трудоемкости его изготовления от года выпуска (б)

При прогнозировании трудоемкости изготовления ГТД необходимо оценить параметр λ , учитывающий уровень механизации $k_{\text{мех}}$ производства [4] (табл.1), а также трудоемкость изготовления первого опытного образца T_1 .

Таблица 1

$k_{\text{мех}}$	$\leq 30\%$	40%	50%	60%	70%	$\geq 80\%$
λ	0,4	0,348	0,295	0,256	0,22	0,18

Уровень механизации (%) определяется как удельное соотношение трудоемкости механизированных и всех работ в технологическом процессе изготовления изделия.

Снижение трудоемкости с ростом размера партии запуска в производство можно учесть поправочным коэффициентом $k_{\text{парт}}$, который равен 1, если в партии 1...4 штуки и $k_{\text{парт}} = 0,8$, если запущено в изготовление более пяти изделий. В технологическом процессе изготовления деталей и узлов ГТД необходимо рассматривать и степень оснащенности $k_{\text{осн}}$, которая оценивается как доля трудоемкости изготовления оснастки к трудоемкости полного оснащения ($k_{\text{осн}} = 0$ при оснащенности опытного производства, $k_{\text{осн}} = 1$ при 100% оснащенности серийного производства).

Для прогнозирования теоретической трудоемкости можно воспользоваться эмпирической зависимостью

$$T_i = \frac{T_1}{i^{\lambda \cdot k_{\text{парт}} \cdot k_{\text{осн}}}}, \quad (2)$$

где i – порядковый номер изделия в серийном производстве, T_1 – трудоемкость первого серийного образца (по сути, опытного образца).

С учетом приведенных выше соотношений фонд заработной платы на одно изделие можно оценить как $\Phi_{\text{ЗП}i} = T_i \cdot k_{\text{чел час}} \cdot Ч_{\text{ЗП}}$. При перевыполнении норм коэффициент $k_{\text{чел час}} \leq 1$, а при невыполнении $k_{\text{чел час}} > 1$ (планируемый $k_{\text{чел час}} = 1,2$ [4]). Здесь $Ч_{\text{ЗП}}$ – почасовая заработная плата. Накладные расходы (условно-переменные и условно постоянные) целесообразно рассчитать с учетом подходов, изложенных в [4].

Для оценки первой составляющей СЖЦ ГТД – затрат на НИОКР, строительно-монтажные и пусконаладочные работы при создании первого опытного образца ($C_{\text{жц}}$) можно воспользоваться данными [1] или статистической зависимостью относительной удельной цены \bar{C}^* (\$США/МВт) от номинальной мощности машины (МВт)

$$0,08210N^2 - 5,7321N + 182,5. \quad (3)$$

Стоимость годового потребления топлива определяется выражением

$$C_{\text{топл}} \approx 3600 \cdot NT_{\text{год}} \cdot C_{\text{т}} \cdot k_{\text{экс}} / (\eta_e \cdot H_u), \quad (4)$$

где N мощность ГТД, кВт; $T_{\text{год}}$ – годовая наработка, ч; $C_{\text{т}}$ – стоимость топлива на данный период, \$США/кг; $k_{\text{экс}}$ – статистический эксплуатационный коэффициент, учитывающий загрузку, техническое состояние, климатические и другие эксплуатационные данные машины, $k_{\text{экс}} = 0,88 \dots 0,92$; H_u – низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг; η_e – эффективный КПД установки (рис. 1).

Затраты на РТО ГТД можно оценить с помощью соотношения [1]

$$C_{\text{РТО}} = \frac{k_a}{T} \sum_{i=0}^T (C_{\text{эр}} + C_{\text{ст}})_i + \frac{C_{\text{доп}}}{Z \cdot T}, \quad (5)$$

где T – расчетный срок службы, лет; k_a – коэффициент внеплановых (аварийных и вынужденных) внеплановых работ, $k_a = 1,05 \dots 1,1$; $C_{\text{эр}}$ – сумма затрат на каждом i – этапе графика РТО в течение всего периода эксплуатации (запасные части, заводской ремонт и пр.); $C_{\text{ст}}$ – сумма затрат на станционные работы; $C_{\text{доп}}$ – дополнительные единовременные затраты на обеспечение РТО (запас основных узлов и деталей, покупка обменных и резервных двигателей, оплата ремонтных бригад и др.); Z – планируемое число агрегатов, для которых необходимы $C_{\text{доп}}$;

Для оценки входящих в формулу (5) стоимостных составляющих $C_{\text{РТО}}$ можно ориентироваться на статистические показатели, выраженные в удельной форме, а именно [1]:

- относительная стоимость заводского ремонта (по отношению к стоимости нового привода); 0,3...0,35;

- относительные затраты на покупку запасных частей (по отношению к общей стоимости РТО); 0,6...0,7;

- относительная стоимость работ, проводимых на станции (по отношению к общей стоимости РТО); ~ 0.1 .

Оценки свидетельствуют, что в общем балансе затрат стоимость привода составляет примерно 16...18%, топлива – 60...65 %, РТО – 15...20 %, масла и материалов – 1...2 % и прочих расходов – ~ 1 %.

Список литературы: 1. Конвертирование авиационных двигателей в стационарные газотурбинные установки [Текст] / В.А. Коваль, Ю.М. Ануров, Е.А. Ковалева и др. – Х.: Монограф, 2010. – 244 с. 2. Использование 3-D и 2-D комплексов CFD при аэродинамической доводке осевых компрессоров газотурбинных двигателей [Текст]/ Ю.М. Ануров, В.А. Коваль, Е.А. Ковалева, В.В. Романов// Насосы. Турбины. Системы. – 2012. - №3(4). – С. – 5 – 11. 3. Коваль В.А. О влиянии радиального зазора на границу срыва осевого компрессора ГТД [Текст]/ В.А. Коваль, Е.А. Ковалева, В.В. Романов// Фундаментальные проблемы применения современных ГТУ в отечественной экономике – результаты освоения и эксплуатации и задачи на будущее: сб. докл. сессии РАН, Казань, 2017 г. – М., 2017. – С. 15 – 22. 4. Ласточкин Ю.В. Модели конкурентоспособности машиностроительного предприятия [Текст]/ Ю.В. Ласточкин, И.И. Ицкович, В.А. Пonomarev. – М.: Изд-во Рос. эконом. акад., 2004. – 192 с.

Bibliography (transliterated): 1. Konvertirovanie aviacionnyh dvigatelej v stacionarnye gazoturbinnye ustanovki [Tekst] / V.A. Koval', Ju.M., Anurov, E.A. Kovaleva i dr. – H.: Monograf, 2010. – 244 s. 2. Ispol'zovanie 3-D i 2-D kompleksov CFD pri aerodinamicheskoj dovodke osevyh kompressorov gazoturbinnih dvigatelej [Tekst]/ Ju.M. Anurov, V.A. Koval', E.A. Kovaleva, V.V. Romanov// Nasosy. Turbiny. Sistemy. – 2012. - №3(4). – S. – 5 – 11. 3. Koval' V.A. O vlijanii radial'nogo zazora na granicu sryva oseвого kompressora GTD [Tekst]/ V.A. Koval', E.A. Kovaleva, V.V. Romanov// Fundamental'nye problemy primeneniya sovremennyh GTU v otechestvennoj ekonomike – rezultaty osvoeniya i jekspluatcii i zadachi na budushhee: sb. dokl. sessii RAN, Kazan', 2017 g. – M., 2017. – S. 15 – 22. 4. Lastochkin Ju.V. Modeli konkurentosposobnosti mashinostroitel'nogo predpriyatija [Tekst]/ Ju.V. Lastochkin, I.I. Ickovich, V.A. Ponomarev. – M.: Izd-vo Ros. jekonom. akad., 2004. – 192 s.

УДК 621.9

А.Г. ДЕРЕВЯНЧЕНКО, д-р техн. наук,
Т.В. КОЖУХАРЬ,
С.К. ВОЛКОВ, Одесса, Україна

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ КЛАССОВ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТЕЙ И СТРУКТУР МАТЕРИАЛОВ

Комплексна система для розпізнавання класів дефектів поверхонь і структур матеріалів. Розглянуто лабораторну комплексну систему, яка забезпечує розпізнавання класів зовнішніх дефектів робочих поверхонь інструментів і деталей машин, дефектів зварних швів, структур конструкційних матеріалів і ін. До її складу входить система технічного зору з набором WEB - камер і різні мікроскопи. Розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення, яке дозволило сформулювати класифікатори для розпізнавання названих дефектів.

Ключові слова: дефекти поверхонь, класифікатори дефектів

Комплексная система для распознавания классов дефектов поверхностей и структур материалов. Рассмотрена лабораторная комплексная система, которая обеспечивает распознавание классов наружных дефектов рабочих поверхностей инструментов и деталей машин, дефектов сварных швов, структур конструкционных материалов и др. В ее состав входит система технического зрения с набором WEB - камер и различные микроскопы. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение, которое позволило сформировать классификаторы для распознавания названных дефектов.

Ключевые слова: дефекты поверхностей, классификаторы дефектов

Complex system for classes of surfaces defects and materials structures recognition. It is considered laboratory complex system, which provides recognition of classes of outward defects of working surfaces of tools and details of machines, defects of the welded stitches, structures of construction materials. The system of technical sight with the WEB set is its member, and different metallography microscopes. Algorithmic software, which allowed to form classifiers for recognition of the adopted defects, is developed.

Keywords: surfaces defects, classifiers for recognition defects

В учебном процессе кафедры технологии конструкционных материалов и материаловедения (ТКММ) ОНПУ магистрами изучается ряд дисциплин, посвященных современным методам контроля качества деталей и соединений, инженерии их поверхностей и распознавания их дефектов, исследованию различных параметров материалов деталей и покрытий, распознаванию структур материалов, разработке соответствующих современных интеллектуальных систем. Поэтому возникла необходимость разработки комплексной лабораторно системы, ориентированной на обеспечение названных методов. В связи со спецификой объектов контроля и диагностирования – наружных дефектов, компонентов структур и др. – в качестве основной подсистемы для получения соответствующей информации выбрана система технического зрения (СТЗ).

В состав разрабатываемой комплексной системы (КС) входят следующие компоненты: 1. Подсистема автоматизированного определения параметров наружных дефектов сварных швов и распознавания их классов; 2. Подсистема автоматизированного определения параметров наружных дефектов рабочих поверхностей деталей и распознавания их классов; 3. Подсистема автоматизированного определения параметров компонентов структуры материалов и распознавания их классов; 4. Подсистема автоматизированного определения микротвердости участков поверхностей шлифов (в частности – шлифов покрытий); 5. Подсистема автоматизированного определения параметров состояния рабочих поверхностей режущих инструментов, распознавания их рабочих состояний и прогнозирования остаточного ресурса (подробно исследована в работах [1, 2] и здесь не рассматривается).

Целью статьи является рассмотрение некоторых из предварительных результатов разработки названных компонентов КС в исследовательской лаборатории кафедры ТКММ ОНПУ. Базовый программный комплекс обработки изображений разработан совместно с к.т.н. Криницыным Д.А [1, 2]. Набор образцов сварных соединений с различными типами наружных дефектов швов любезно предоставлен кафедре ТКММ ОНПУ руководством Одесского общества сварщиков. Кафедра сотрудничает с Одесским центром «Плазмотехнологии» (СПД – Федюк В.И.) и Одесским центром «Сварка и восстановление деталей». В ходе этого сотрудничества планируется исследование дефектов деталей и соединений, подлежащих восстановлению.

Предварительно рассмотрим общий подход к распознаванию классов дефектов и компонентов структур. В разрабатываемой КС многоуровневое распознавание классов наружных дефектов поверхностей и соединений, компонентов структур по их цифровым изображениям основано на использовании признаков формы контуров дефектов, признаков внутренних текстур дефектов, цветовых составляющих и др. В данной работе кратко освещено использование только признаков формы контуров дефектов. Рассмотрим основные положения используемого подхода к обработке цифровых изображений, базирующегося на материалах работ [3-5]. Исходная (A) и преобразованная (B') матрицы цифрового изображения зоны и контура дефекта с известными параметрами пикселей ($\Delta x, \Delta y$) являются основой для расчета комплекса первичных, основных и вторичных параметров контуров, используемых при распознавании классов формы. Соответствующие зависимости (рис.1) составлены на основе данных работ [3, 4].



Рисунок 1 – Некоторые из зависимостей для определения первичных, основных (а) и вторичных (б) признаков формы контуров поверхностных дефектов и компонентов структур материалов

При разработке математического обеспечения и алгоритмов распознавания использовались базовые работы по теории распознавания образов, в частности [4-8]. Для распознавания классов форм дефектов выбраны статистические методы распознавания [2, 7] и метод эталонов [7, 8]. После выбора метода распознавания выполняется анализ множества признаков формы (S_i^F ($i = 1..u$)), где: u – первичное количество признаков) контуров на информативность с использованием методов полного и сокращенного перебора [2] – с целью сокращения его размерности. Вследствие этого множество признаков сокращается до размера u_i ($u_i \ll u$). Каждый класс формы характеризуется соответствующим вектором:

$$S^F = (S_1^F, S_2^F, S_3^F, \dots, S_i^F, \dots, S_{u_i}^F).$$

Этот вектор и множество других принадлежат пространству классов компонентов структур размерности u_i , включающему множество классов форм контуров тех или иных дефектов - $\Omega_1^{FD}, \Omega_2^{FD}, \Omega_3^{FD} \dots \Omega_p^{FD}$. На стадии обучения системы распознавания формируются решающие правила, совокупность которых образует классификатор соответствующих дефектов. Перейдем к описанию основных подсистем КС.

Рассмотрим подсистему для автоматизированного определения параметров наружных дефектов сварных швов и распознавания их классов. Ее общие виды приведены на рис. 2. На стойке 2, установленной на основе 1, крепится монтажная траверса 3 подсистемы освещения 9 участка шва. Объект

контроля (сварной шов 6) соединяет две пластины 5. На traversе 4 собрано устройство линейных перемещений цифровой камеры 7 относительно контролируемого участка шва. На него направляется световой поток от системы подсветки 9. Отраженный поток поступает в объектив цифровой камеры 7. После предобработки на экране ПК (10) формируется цифровое изображение 8 участка шва. Дистанционное управление подсистемой может выполняться с использованием пульта 11. Рассмотрим пример выявления дефектов швов (рис. 3-5).

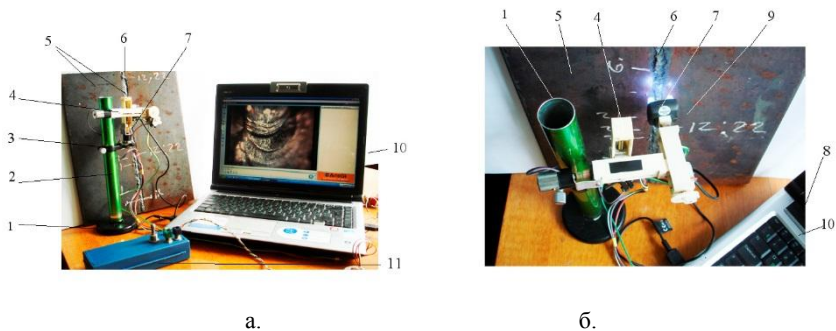


Рисунок 2 – Общие виды подсистемы распознавания наружных дефектов сварных швов

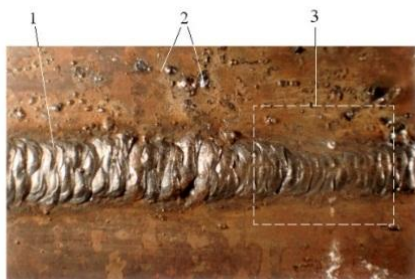
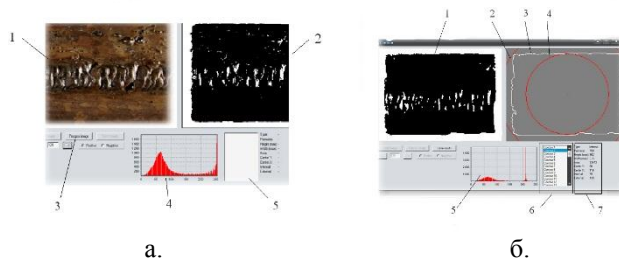


Рисунок 3 – Фрагмент изображения участка шва 1 с дефектами двух классов (2 – «брызги» [9], 3 – резкое изменение ширины шва)

На рис. 4-5 приведено изображение рабочих панелей специального программного комплекса, который обеспечивает получение набора признаков для распознавания классов дефектов.



а.

б.

Рисунок 4 – Изображения рабочей панели комплекса обработки изображения сварного шва (этап формирования бинарного изображения 2 по исходному (1), гистограммы яркости 4 и окна параметров 5 (3 – одна из кнопок управления)) – а.; изображения рабочей панели комплекса обработки изображения сварного шва (этап определения комплекса геометрических параметров шва: 1 – бинарное изображение; 2 и 4 – контуры вписанной и описанной окружностей вокруг элемента шва 3; 5 – гистограмма яркости; 6 – панель выделяемых контуров; 7 – набор параметров одного из контуров элемента шва) - б.

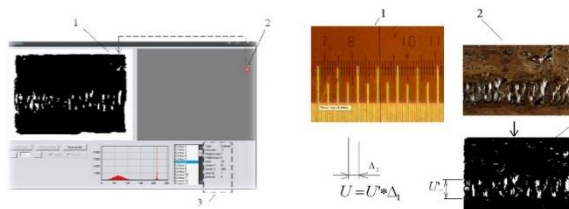


Рисунок 5 – Изображения рабочей панели комплекса обработки изображения сварного шва (этап выявления дефекта класса «брызги»: 1 – дефект на бинарном изображении; 2 – его контур, выделенный вне зоны шва) – а.; использование мерных шкал (1) для определения размеров дефектов шва на изображениях (2, 3) и параметров их расположения - б.

Перейдем к рассмотрению подсистемы для автоматизированного определения параметров наружных дефектов рабочих поверхностей деталей и распознавания их классов. Укрупненная структура подсистемы включает следующие аппаратные и программные элементы: 1. Объект контроля - деталь, дефекты рабочих поверхностей которой подлежат распознаванию; 2. Цифровая камера; 3. Система освещения дефектной поверхности; 4. Устройство перемещения цифровой камеры в трех направлениях; 5. Пульт дистанционного управления; 6. Специализированная система технического зрения; 7. ПК; 8. Программный модуль обработки цифровых изображений дефектных поверхностей; 9. Программный модуль выделения контуров дефектов; 10. Программный модуль определения комплекса информативных параметров контуров; 11 - программный - модуль определения комплекса

параметров текстур зон дефектов; 12 - программный модуль - комплексный классификатор для распознавания классов дефектов; 13 – база данных, где накапливаются результаты распознавания (классы дефектов и материалы их статистического анализа).

На рис. 6 приведены общие виды подсистемы контроля наружных дефектов рабочих поверхностей деталей (на примере контроля дефектов детали «распредвал»).

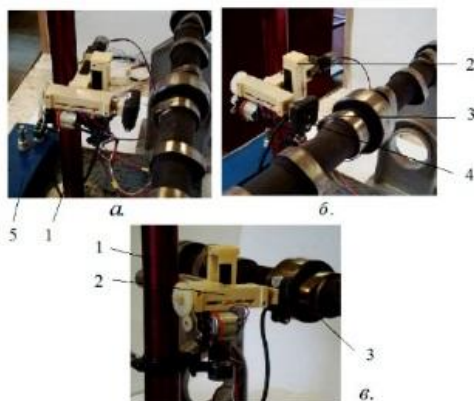


Рисунок 6 – Общие виды подсистемы контроля и распознавания наружных дефектов рабочих поверхностей деталей

Приняты следующие обозначения: 1 – монтажная стойка; 2 – устройство перемещения цифровой камеры в 3-х направлениях; 3 – цифровая камера; 4 – система подсветки; 5 – пульт дистанционного управления подсистемой. На рис. 7 приведены фрагменты изображений рабочих панелей, обеспечивающих выделение контуров дефектов и определение признаков их формы.

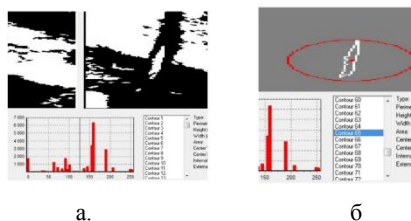


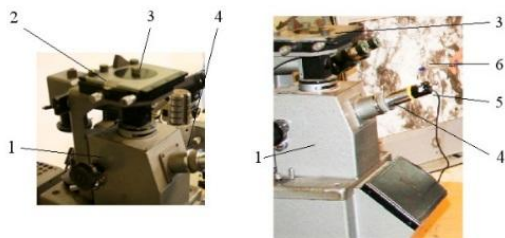
Рисунок 7 – Виды окон программного комплекса с цифровым бинарным изображением зоны дефекта (трещины) на поверхности детали (а) с фрагментом панели для определения размеров, ориентации дефекта и его формы (б).

Рассмотрим подсистему для автоматизированного определения параметров компонентов структуры материалов и распознавания их классов. В структуре исследований свойств материалов и состояний поверхностей деталей в современном материаловедении важное место занимает распознавание компонентов структур материалов. Соответствующие методы, системы и приборы отображены во многих научных трудах отечественных и зарубежных авторов. Вопросам соответствующих исследований с использованием компьютерных технологий и систем посвящены работы Русина Б.П. и Досина Д.Г., Гонтового С.В. и Емельянова В.А., Калининой Н.Ю., Михалева О.И. и Помулева В.И., Скобло Т.В. и многих других. Существует ряд современных специализированных автоматизированных и автоматических систем для распознавания компонентов структур материалов. Но во многих лабораториях и предприятиях еще и до сих пор используют металлографические микроскопы мод. МИМ-7. Поэтому он и использован в разрабатываемой подсистеме КС.

Структура подсистемы содержит следующие основные элементы:

1. Шлиф материала детали;
2. WEB-камера СТЗ, размещенная в тубусе окуляру микроскопа;
3. Собственно микроскоп мод. МИМ-7;
4. ПК;
5. Программный модуль предобработки цифрового изображения шлифа;
6. Программный модуль выделения контуров компонентов структур материалов;
7. Программный модуль определения параметров формы компонентов структур материалов;
8. Программный модуль определения комплекса параметров текстуры компонентов структур материалов;
9. Комплексный классификатор для распознавания классов компонентов структур материалов;
10. База данных с результатами распознавания (выявленные классы компонентов структур материалов и параметры качества распознавания). Общие виды рабочих зон металлографического микроскопа приведены на рис. 8.

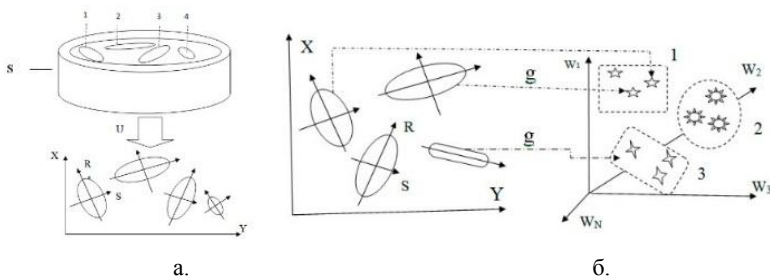
Процесс формирования информативной зоны шлифа с набором компонентов структуры материала представлен схематически на рис. 9.а. Здесь S – модель шлифа образца материала, в условной информативной зоне которого выделены модели компонентов структуры 1–4. Предобработка изображения (U) обеспечивает выделение контуров компонентов в общей системе координат изображения (X, Y) и формирование локальных систем координат каждого контура (R_i, S_i). Процесс распознавание классов компонентов структур материала в соответствующем пространстве признаков W размерности N укрупненно и условно показан на рис. 9, б.



а. б.

Рисунок 8 – Общие виды рабочих зон металлографического микроскопа мод. МИМ-7, использованного в подсистеме автоматизированного определения параметров компонентов структуры материалов и распознавания их классов. (1 – корпус микроскопа; 2 – предметный столик; 3 – анализируемый микрошлиф; 4 – тубус окуляра микроскопа; 5 – цифровая камера; 6 – экран монитора с цифровым изображением поверхности микрошлифа)

Процесс обучения системы распознавания (условно обозначен как g) обеспечивает формирование набора классов форм компонентов, которым в пространстве W соответствуют области 1, 2, 3.



а. б.

Рисунок 9 – Схематическое представление процесса формирования информативной зоны шлифа с набором компонентов структуры материала (а) и процесса распознавание классов компонентов структуры материала в соответствующем пространстве признаков (б)

Фрагменты укрупненной блок – схемы алгоритма распознавания классов компонентов структуры материала по цифровому изображению его шлифа приведены на рис. 10.

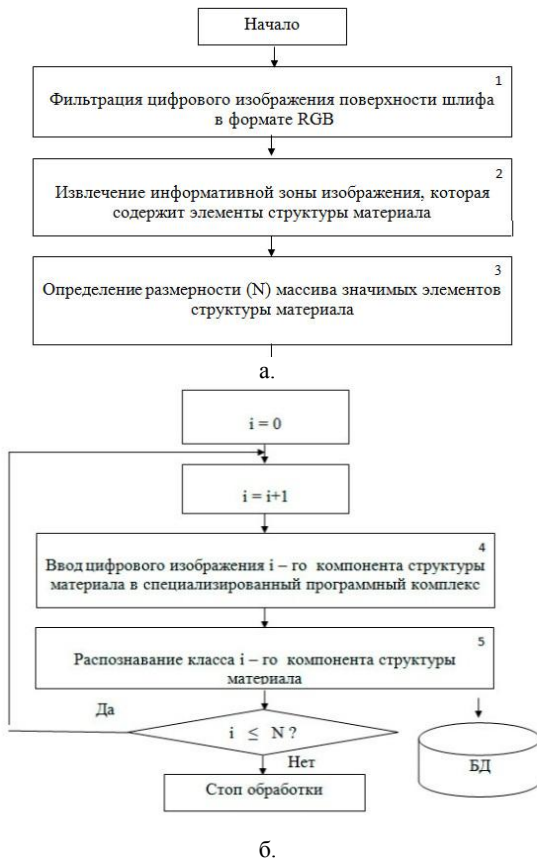


Рисунок 10 – Фрагменты блок – схемы алгоритма распознавания классов компонентов структуры материала по цифровому изображению его шлифа (а – предварительная обработка и определение комплекса признаков форма контура компонента структуры: б - собственно распознавание класса)

Рассмотрим некоторые из результатов предварительной обработки изображения шлифа материала для определения информативных признаков формы компонентов структур. Цифровое изображения информативной зоны микрошлифа детали из серого чугуна СЧ 15 приведено на рис. 11, а; фрагменты результатов его предварительной обработки показаны на рис. 11, б, в.

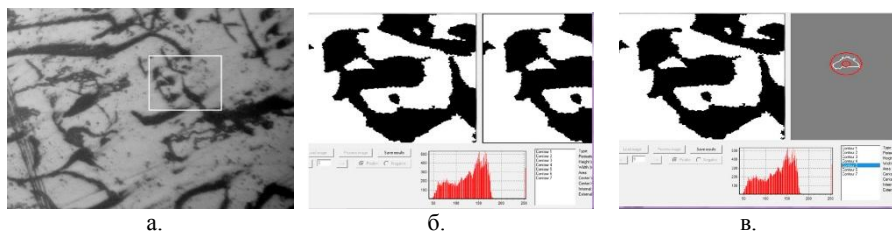


Рисунок 11 – Пример предварительной обработки цифрового изображения информативной зоны микрошлифа детали из серого чугуна СЧ 15
 (а) – зона анализа выделена белым квадратом; б – бинарное изображение компонентов структуры; в – предварительный результат выделения контура одного из компонентов и определения набора его параметров формы

Рассмотрим пример работы подсистемы автоматизированного определения микротвердости образца (рис. 12).

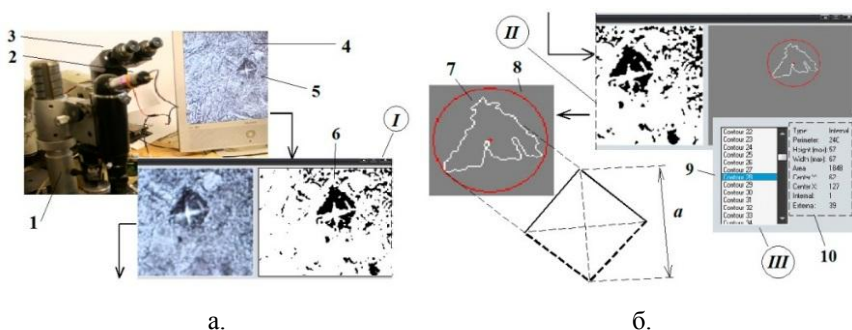


Рисунок 12 – Схема автоматизированного определения микротвердости образцов

Приняты следующие обозначения: 1 – микротвердомер мод. ПМТ-3; 2 - WEB-камера СТЗ, заменившая окуляр; 3 – бинокулярный микроскоп для предварительного исследования контролируемых образцов; 4 – экран монитора с изображением отпечатка 5, оставленного алмазной пирамидкой; 6 – бинарное изображением отпечатка пирамидки в структуре рабочей панели I; 7 – полуконтур отпечатка с описанной окружностью 8 в структуре рабочей панели II; 9, 10 – окна параметров полуконтура отпечатка в структуре рабочей панели III; а – размер диагонали отпечатка, по которому с использованием известной формулы определяется микротвердость.

В заключение отметим, что предварительные исследования подсистем разрабатываемой КС и соответствующего программного

обеспечения на ряде экспериментальных образцов подтвердили их работоспособность. Дальнейшие исследования будут направлены на повышение качества распознавания. В настоящее время некоторые из компонентов КС уже используются в учебном процессе и исследовательских работах (совместно с магистрами кафедры ТКММ ОНПУ).

Список литературы: 1. *Деревянченко А.Г.* Интеллектуальная система диагностирования отказов и прогнозирования ресурса режущих инструментов/ *Деревянченко А.Г., Криницын Д.А.*. – Одесса: Астропринт. 2012. – 202 с. 2. Интеллектуальные системы распознавания состояний режущих инструментов/ *Деревянченко А. Г., Павленко В. Д., Фомин А.А., Павленко С.В., Бовнегра Л.В.*. – Одесса: Астропринт. 2013. – 300 с. 3. *Шмидт Д., Шварц В.* Оптоэлектронные сенсорные системы. — Пер. с нем. — М.: Мир, 1991. 4. *Шапиро Л., Стокман Дж.* Компьютерное зрение. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. –2006. 5. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений.- М.: Техносфера. 2006. – 615 с. 6. *Форсайт П.* Компьютерное зрение. Современный подход. –М.: Издательский дом Вильямс. – 2004 – 928 с. 7. *Горелик А.Л.* Методы распознавания / *Горелик А.Л., Скрипкин В.А.*. – М.: Высшая школа. 1984 – 208 с. 8. *Васильев В.И.* Распознающие системы. Справочник. – Киев: Наукова думка. 1983.– 216 с. 9. Настанова з візуального і вимірювального контролю зварних з'єднань та наплавок металевих конструкцій. - ДСТУ-Н Б А.3.1-11:2008. – 63 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Derevjanchenko A.G.* Intel'ktual'naja sistema diagnostirovanija otkazov i prognozirovanija resursa rezhushchih instrumentov/ *Derevjanchenko A.G., Krinicyн D.A.*. – Odessa: Astroprint. 2012. – 202 s. 2. Intel'ktual'nye sistemy raspoznavanija sostojanij rezhushchih instrumentov/ *Derevjanchenko A. G., Pavlenko V. D., Fomin A.A., Pavlenko S.V., Bovnegrа L.V.*. – Odessa: Astroprint. 2013. – 300 s. 3. *Shmidt D., Shvarc V.* Optoelektronnye sensornye sistemy. — Per. s nem. — M.: Mir, 1991. 4. *Shapiro L., Stokman Dzh.* Komp'juternoe zrenie. – M.: BINOM. Laboratorija znaniy. –2006. 5. *Gonsales R., Vuds R.* Cifrovaja obrabotka izobrazhenij.- M.: Tehnosfera. 2006. – 615 s. 6. *Forsajt P.* Komp'juternoe zrenie. Sovremennyj podhod. –M.: Izdatel'skij dom Vil'jams. – 2004 – 928 s. 7. *Gorelik A.L.* Metody raspoznavanija / *Gorelik A.L., Skripkin V.A.*. – M.: Vysshaja shkola. 1984 – 208 s. 8. *Vasil'ev V.I.* Raspoznajushhie sistemy. Spravochnik. – Kiev: Naukova dumka. 1983.– 216 s. 9. Nastanova z vizual'nogo i vimirjuval'nogo kontrolju zvarnih z'ednan' ta naplavok metaljevih konstrukcij. - DSTU-N B A.3.1-11:2008. – 63 s.

УДК 621.9

Г.П. КЛИМЕНКО, д-р техн. наук,
В.В. КВАШНИН, Краматорськ, Україна

ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ ІНСТРУМЕНТІВ ЗБІРНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Математична модель для визначення надійності модульних інструментів за допомогою методу резервного копіювання. Ми розглядаємо три типи забезпечення: завантаженого, розвантаженого та легкий. Залежності, отримані для розрахунку надійності ріжучих інструментів, використовуваних для прогнозування їх ефективності. Математична модель надійності модульної причіпної фабрики розроблена як системи. Визначено стратегію заміни ріжучих елементів млина для досягнення доцільного рівня її надійності, яка визначається критерієм приведених витрат.

Ключові слова: модульні інструменти, розрахунок надійності

Математическая модель для определения надежности модульных инструментов с помощью метода резервного копирования. Мы рассматриваем три вида обеспечения: загруженный, разгруженный и легкий. Зависимости, полученные для расчета надежности режущих инструментов, используемых для прогнозирования их эффективности. Математическая модель надежности модульной прицепной мельницы разрабатывается как системы. Определена стратегия замены режущих элементов мельницы для достижения целесообразного уровня ее надежности, которая определяется критерием приведенных затрат.

Ключевые слова: модульные инструменты, расчет надежности

The mathematical model for determining the reliability of modular tools with the method of backup. We consider three types of provision: loaded, unloaded and lightweight. The dependences obtained for calculating the reliability of cutting tools used to predict their performance. The mathematical model of reliability of a modular trailer mill is developed as systems. Strategy of replacement of cutting elements of a mill for achievement of expedient level of its reliability which is defined by criterion of the resulted expenses is defined.

Keywords: modular tooling, reliability

Вступ

Прогнозування надійності різальних інструментів при підвищенні ступеня автоматизації металорізальних верстатів потребує розробки нових математичних моделей, дозволяючих прогнозувати відмови інструментів, від яких залежать зростаючі по вартості простої обладнання. Особливу актуальність точність прогнозування безвідмовності має для збірних твердосплавних різців важких верстатів, відмови яких досягають при чорновій обробці 45%, а час заміни великовагового інструменту збільшується зі збільшенням типорозміру верстата і коливаються від 10 до 55 хвилин.

Особливістю роботи збірного багатолезового інструменту є одночасна участь в роботі декількох ріжучих зубців. Аналіз роботи збірних кінцевих фрез у виробничих умовах показав, що при відмові одного зубця фрези

інструмент не знімається з верстата. Статистичний аналіз роботи 22 фрез $z = 4$ в виробничих умовах ЗАТ НКМЗ при обробці сталі 9ХС з глибиною різання $t = 4..6$ мм, подачею $S_z = 0,12 \dots 0,15$ мм / зуб і швидкістю різання $V = 62,8$ м/хв показав, що найчастіше (92% випадків обробки) фреза знімається з верстата при виході з ладу всіх 4-х зубців. Така експлуатація фрез призводить до підвищеної витрати інструментальних матеріалів. Характерною відмовою пластин фрези є їх поломка, а не досягнення критерію затуплення пластини. Статистичний аналіз показав, що закон розподілу стійкості фрез – експоненціальний.

Прогнозування рівня надійності інструментів дозволяє організувати регламентовану заміну інструменту і скоротити простої верстата.

Основна частина

Метою цієї роботи є підвищення ефективності металообробки шляхом прогнозування надійності збірних різців і фрез і скорочення простоїв у зв'язку з їх відмовами.

При розробці математичних моделей збірний різальний інструмент розглядається як система.

З точки зору надійності різці з твёрдосплавними багатограними непереточуваними пластинами мають паралельне з'єднання ріжучих елементів, так як система (інструмент) відмовляє тільки після виходу всіх елементів (ріжучих вершин) з ладу [1]. Найбільш ефективним методом підвищення надійності таких систем є метод резервування. Існує два методи резервування: загальне, при якому резервується система в цілому, і роздільне (поелементне) резервування, при якому резервуються окремі елементи системи.

Загальне резервування для збірного ріжучого інструменту можливо реалізувати застосуванням різних зміцнюючих технологій, що підвищують надійність всієї багатогранної пластини. Поелементне резервування для збірного різця здійснюється введенням в зону обробки нового різального елемента при відмові попереднього шляхом повороту багатогранної пластини. При обробці збірними фрезами характер резервування дещо інший, так як при відмові однієї ріжучої вершини фрези її працездатність не порушується до деякого часу, а навантаження ріжучого елемента який відмовив приймають на себе працездатні ріжучі грані що залишилися [2, 3].

При цьому, в першому випадку резервування здійснюється з цілою кратністю, при якому нормальна робота різця здійснюється шляхом заміни грані яка відмовила послідовно $(n-1)$ гранню n -гранної пластинки. Резервуванням з дробовою кратністю називають таке резервування, при якому резервні елементи припадають на кілька основних, як у випадку фрезерування, наприклад, торцевими збірними фрезами [4].

Розглядаючи працездатність збірного різця з точки зору його надійності замінням, можливі три види умов роботи граней пластини до моменту їх включення в різання.

Перший вид - навантажений резерв, при якому ресурс граней пластини починає витрачатися з моменту включення всієї пластини в роботу. При цьому необхідно враховувати теплові потоки і напруження всієї пластини, хоча в зоні різання знаходиться одна вершина. Закони розподілу стійкості та ймовірність безвідмовної роботи для всіх вершин будуть однаковими.

Другий вид резерву характеризується тим, що зовнішні умови, що впливають на ріжучі грані, які не перебувають в роботі, до моменту їх включення в роботу – полегшені. У цьому випадку інтенсивність витрати резервних граней трохи нижче, ніж в першому випадку. Це відповідає стану всієї ріжучої пластини досить великих розмірів з достатнім віддаленням від робочої ріжучої кромки всіх інших граней.

Третій вид резерву - холодний або ненавантажений. Цією моделлю надійності можна користуватися при припущеннях, що ріжуча грань починає витрачати свій ресурс тільки з моменту повороту пластини і заміни грані яка відмовила. При цьому на рівень надійності різця буде впливати інтенсивність заміни грані що відмовила, яка залежить від конструкції різця та є показником його ремонтопридатності.

Загальна формула для розрахунку надійності збірного різця з n - гранною непереточуваною пластиною має вигляд:

$$R_n(t) = R_{n-1}(t) + \int_0^t R(t, \tau) a_n(t) d\tau, \quad (1)$$

где $R_n(t)$ – надійність різця з n - гранною пластиною;

$R(t, \tau)$ – надійність однієї резервної грані у період часу $t - \tau$ за умови, що до моменту часу τ вона працездатна;

$a_{n-1}(\tau)$ – частота відмов збірного різця при $(n - 1)$ поворотах пластини.

Імовірність відмови різця $Q_n(t)$ визначається:

$$Q_n(t) = \int_0^t Q(t, \tau) a_{n-1}(\tau) d\tau, \quad (2)$$

де $Q(t, \tau)$ - імовірність відмови резервної грані протягом часу $t - \tau$.

Формули (1) і (2) дозволяють обчислити рівень надійності збірних різців з n -гранними пластинами (кратність резервування дорівнює $n - 1$).

У випадку, коли резервні грані пластини втрачають надійність з моменту заміни елемента, що відмовив (третій вид резерву), відмова $(n - 1)$ граней пластини до моменту t статися не може, тобто накопиченням ушкоджень у всій пластині при роботі однією гранню нехтуємо.

Імовірність безвідмовної роботи збірного різця в цьому випадку визначається:

$$R_n(t) = R_{n-1}(t) + \int_0^t R(t, \tau) a_n(t) d\tau = 1 - \int_0^t Q(t, \tau) a_{n-1}(\tau) d\tau, \quad (3)$$

Формула (3) дозволяє обчислити рівень надійності збірного різця при будь-яких законах розподілу часу роботи кожної грані пластини.

У випадку експоненціального закону розподілу стійкості кожної грані збірного різця, розрахунок його показників надійності:

а) при полегшеному резерві:

$$R(t) = e^{-\lambda_0 t} \prod_{i=1}^n \left[1 + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{a_i}{i!} (1 - e^{-\lambda_0 t})^i \right]; \quad (4)$$

б) при ненавантаженому резерві:

$$R(t) = e^{-\lambda_0 t} \prod_{i=1}^n \left[\sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!} \right]; \quad (5)$$

де $i = 1 \dots n$ - число граней ріжучої пластини збірного різця;

λ - інтенсивність відмов пластин за період $0 - t$.

Представлені вирази дозволяють обчислювати надійність збірного різця в залежності від інтенсивності відмов кожної вершини його ріжучої пластини.

При розгляді збірної фрези як системи різальних елементів, в якій відмова одного з них не призводить до повної відмови фрези, з точки зору надійності фреза являє собою паралельну систему з пасивним резервом. В цьому випадку, при відмові першої різальної пластини її навантаження при різанні сприймає наступна за нею різальна пластинка. При цьому надійність фрези в цілому знижується, тобто зменшується ймовірність безвідмовної роботи. Для кінцевої фрези, що має два зуба:

$$[P_1(t) + Q_1(t)][P_2(t) + Q_2(t)] = 1, \quad (6)$$

де $P_1(t)$, $P_2(t)$ - ймовірність безвідмовної роботи відповідно першого і другого зуба фрези; $Q_1(t)$, $Q_2(t)$ - ймовірність відмови кожного зуба.

Після множення отримаємо:

$$P_1(t)P_2(t) + P_2(t)Q_1(t) + Q_2(t)P_1(t) + Q_1(t)Q_2(t), \quad (7)$$

де $P_1(t)P_2(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи обох зубів протягом часу t ; $P_2(t)Q_1(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи одного зуба при наявності відмови другого зуба; $Q_1(t)Q_2(t)$ – ймовірність відмови двох зубів за час t .

Сума перших трьох членів в (7) являє собою ймовірність безвідмовної роботи фрези з двох зубів у випадку, якщо робота хоча б одного з них є ознакою працездатності фрези. Підставивши $Q(t)=1-P(t)$, отримаємо:

$$P_{\phi p} = P_1(t) + P_2(t) - P_1(t)P_2(t). \quad (8)$$

При експоненціальному законі розподілу часу безвідмовної роботи кожного зуба фрези отримуємо:

$$P_{\phi p} = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t},$$

де λ_1 и λ_2 – інтенсивність відмов зубів фрези.

Тоді середній період стійкості фрези визначається:

$$\bar{T}_{\phi p} = \int_0^{\infty} P_{\phi p} dt = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2}; \quad (9)$$

У випадку якщо $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, то

$$P_{\phi p} = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}; \quad \bar{T} = \frac{3}{2\lambda}.$$

Для твердосплавних фрез, що мають $z = 2, 3, 4$ розрахунок імовірності безвідмовної роботи кожної фрези отримано аналогічно перемноженням імовірності двочленів (див. табл. 1).

Для визначення стратегії заміни ріжучих елементів фрез які відмовили введемо поняття кратності резервування k :

$$k = \frac{Z - Z_m}{Z_m},$$

де Z – число зубів фрези; Z_m – число зубів які відмовили.

Залежності $P_{\phi p}(t)$ при резервуванні з різною кратністю наведені в таблиці 1.

Доцільний рівень надійності фрези визначається мінімумом сумарних витрат на експлуатацію інструменту та на його покупку.

Залежно від необхідного рівня надійності фрези вибирається стратегія заміни її ріжучих елементів. Підвищення надійності шляхом заміни одного зуба що відмовив призводить до недовикористання ресурсів фрези та підвищенню сумарних витрат. Найбільш доцільно з точки зору раціонального рівня надійності для фрези з $Z = 4$ знімати її з верстата при виході з ладу 2-х зубів

Таблиця 1 – Вибір стратегії заміни пластин фрези

число зубів фрези	кратніс ть резерву вання	Імовірність безвідмовної роботи фрези				
		Імовірність безвідмовної роботи	Стратегія заміни зубів	λt		
				0,5	0,75	1
Z=2	1/1	$P_{фр}(t) = 2P - P^2$	Після відмови 1-го зуба фреза знімається з верстата	0,7 301	0,8 431	0,6 005
Z=3	1/2	$P_{фр}(t) = 3P^2 - 2P^3$	Після відмови 2-х зубів фреза знімається з верстата	0,5 243	0,6 575	0,3 063
	2/1	$P_{фр}(t) = P^3 + 3P - 3P^2$	Після відмови 1-го зуба фреза знімається з верстата	0,6 721	0,8 288	0,4 683
Z=4	1/3	$P_{фр}(t) = 4P^3 - 3P^4$	Після відмови 1-го зуба фреза знімається з верстата	0,3 741	0,4 862	0,1 443
	2/2	$P_{фр}(t) = 6P^2 + 3P^4 - 8P^3$	Після відмови 2-х зубів фреза знімається з верстата	0,6 734	0,8 288	0,4 683
	3/1	$P_{фр}(t) = 4P + 4P^3 - 6P^2 - P^4$	Після відмови 1-го зуба фреза знімається з верстата	0,9 203	0,9 757	0,8 407

Доцільний рівень надійності збірного різця, який закладається на стадії його проектування визначається виходячи з економічних критеріїв: витрат на інструмент та експлуатаційних витрат. Залежність приведених витрат від рівня надійності збірного різця не має оптимуму, тому що підвищення надійності завжди потребує додаткових витрат. Однак, швидкість цих витрат [5] істотно підвищується в діапазоні ймовірності безвідмовної роботи, що дорівнює 0,7 - 0,8.

Висновки

1. Розглядаючи збірний різальний інструмент як систему, застосовуючи методи теорії надійності, пов'язані з різними видами резервування, отримані математичні моделі для визначення показників безвідмовності збірних інструментів з багатограними непереточуваними пластинами.

2. На стадії проектування інструментів, розроблені залежності дозволяють визначати конструктивні параметри інструменту в залежності від необхідного рівня його надійності.

3. Отримані залежності дозволяють розраховувати рівень надійності інструменту при будь-якому законі розподілу його стійкості на стадії експлуатації.

4. Доцільний рівень надійності, визначений в залежності від сумарних витрат, забезпечується регламентованою заміною ріжучих пластин що відмовили.

Список використаних джерел: 1. *Клименко Г.П.* Применение марковских и полумарковских цепей при оценке надежности технологической системы/ *Г.П. Клименко* // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Межд. сб. научных трудов. - Донецк: ДонНТУ, 2004. - Вып.28. - с.71-76 2. *Клименко Г.П.* Определение надежности концевых фрез сборной конструкции/ *Г.П. Клименко, А.В. Хоменко, К.С. Чабан* // Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем Вып.26. - Краматорск: ДГМА, 2010 с.63- 67 3. *Клименко Г.П.* К вопросу определения надежности многолезвийного инструмента/ *Г.П. Клименко, - А.О. Денисова* // Материалы IX международного научно - технического семинара, Тяжелое машиностроение. - Краматорск: ДГМА, 2011. - с.59 4. *Клименко Г.П.* Определение качества сборных торцовых фрез/ *Г.П. Клименко, А.О. Денисова* // - Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. Вып. 28. - Краматорск: ДГМА, 2011. - с. 56 - 60 5. *Клименко Г.П.* Підвищення стабільності обробки деталей збірними різцями важких верстатів з ЧПК/ *Г.П. Клименко, О. Ю. Андронов* // Сучасні технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць. Вип.4. - Харків: НТУ «ХПІ», 2010. - 239 - 246 6. *Клименко Г.П.* Повышение точности обработки деталей на станках с ЧПУ / *Г.П. Клименко, С.А. Полонников* // Научный Вестник: ДГМА, - г. Краматорск, N1(13E), 2014. - с. 46-54.

Bibliography (transliterated): 1. *Klimenko G.P.* Primenenie markovskih i polumarkovskih cepej pri ocenke nadezhnosti tehnologicheskoy sistemy/ *G.P. Klimenko* // Progressivnyye tehnologii i sistemy mashinostroeniya. Mezhd. sb. nauchnyh trudov. - Doneck: DonNTU, 2004. -Vyp.28. - s.71-76 2.*Klimenko G.P.* Opredelenie nadezhnosti koncevnyh frez sbornoj konstrukcii/ *G.P. Klimenko, A.V. Homenko, K.S. Chaban* // Nadezhnost' rezhushhego instrumenta i optimizacija tehnologicheskikh sistem Vyp.26. - Kramatorsk: DGMA, 2010 s.63- 67 3. *Klimenko G.P.* K voprosu opredeleniya nadezhnosti mnogolezviynogo instrumenta/ *G.P. Klimenko, - A.O. Denisova* // Materialy IX mezhdunarodnogo nauchno - tehnicheskogo seminar, Tjazheloe mashinostroenie. - Kramatorsk: DGMA, 2011. - s.59 4.*Klimenko G.P.* Opredelenie kachestva sbornyh torcovykh frez/ *G.P. Klimenko, A.O. Denisova* // - Nadezhnost' instrumenta i optimizacija tehnologicheskikh sistem. Vyp. 28. - Kramatorsk: DGMA, 2011. - s. 56 - 60 5. *Klimenko G.P.* Pidvishennja stabil'nosti obrobki detalej zbirnimi rizcjamy vazhkikh verstativ z ChPK/ *G.P. Klimenko, O. Ju. Andronov* // Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni. Zbirnik naukovih prac'. Vip.4. - Harkiv: NTU «HPI», 2010. - 239 - 246 6. *Klimenko G.P.* Povyshenie tochnosti obrabotki detalej na stankah s ChPU / *G.P. Klimenko, S.A. Polonnikov* // Nauchnyj Vestnik: DGMA, - g. Kramatorsk, N1(13E), 2014. - s. 46-54.

УДК 621.91

Є. В. МИРОНЕНКО, д-р техн. наук,
В. В. КАЛІНІЧЕНКО, канд. техн. наук,
Д. Є. ГУЗЕНКО, Краматорськ, Україна

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ РІЗЦІВ З ТВЕРДОСПЛАВНИМИ РІЗАЛЬНИМИ ПЛАСТИНАМИ ЗІ ЗНОСОСТІЙКИМИ ПОКРИТТЯМИ ПРИ НАПІВЧИСТОВІЙ ОБРОБЦІ ВАЛКІВ ПРОКАТНИХ СТАНІВ

У статті наведені результати стійкісних випробувань токарних різців з твердосплавними різальними пластинами зі зносостійкими покриттями різних фірм-виробників в умовах напівчистої обробки сталевих валків прокатних станів з великими діаметрами бочки. На підставі аналізу результатів стійкісних випробувань визначені марки твердих сплавів, найбільш перспективні для використання у досліджуваній області обробки.

Ключові слова: валок прокатного стану, напівчистове точіння, різець, твердосплавна різальна пластина, зносостійке покриття, зношування, стійкісні випробування

В статье приведены результаты стойкостных испытаний токарных резцов с твердосплавными режущими пластинами с износостойкими покрытиями различных фирм-производителей в условиях получистой обработки стальных валков прокатных станов с большими диаметрами бочки. На основании анализа результатов стойкостных испытаний определены марки твердых сплавов, наиболее перспективные для применения в исследуемой области обработки.

Ключевые слова: валок прокатного стану, получистовое точение, резец, твердосплавная режущая пластина, износостойкое покрытие, изнашивание, стойкостные испытания

In the article results of durability tests of cutting tools with hard-alloy cutting plates with wearproof coatings from different manufacturers in a semifinish turning of steel mill rolls with large roll barrel diameters are presented. On the basis of analysis of durability tests results the most prospected hard alloy grades for application in the studied processing area are determined.

Keywords: mill roll, semifinish turning, cutting tool, hard alloy cutting plate, wearproof coating, wear, durability tests

Вступ. Постановка проблеми

Токарна обробка валків прокатних станів характеризується значною питомою часткою часу в структурі загальної трудомісткості виготовлення валків. Тому підвищення ефективності токарної обробки прокатних валків є актуальною науково-практичною задачею, що стоїть перед підприємствами-виробниками прокатного обладнання. У ході технічного переоснащення виробництва прокатних валків на підприємствах галузі повною мірою постає проблема ефективного інструментального забезпечення токарної обробки. Зокрема, при токарній обробці сталевих прокатних валків все частіше використовуються різці з твердосплавними різальними пластинами зі зносостійкими покриттями виробництва провідних світових фірм-

виробників інструменту («Sandvik Coromant» «Kennametal», «Toshiba Tungaloy», «Pramet», «Iscar» та ін.). Особливості технологічного процесу виготовлення прокатних валків часто вимагають використання таких різців не тільки на чистових операціях, але й на операціях напівчистої токарної обробки. Відтак вивчення та наукове обґрунтування можливостей ефективної напівчистої токарної обробки сталевих валків прокатних станів різцями з твердосплавними різальними пластинами зі зносостійкими покриттями має велике практичне значення для підприємств галузі. При цьому вирішення проблеми підвищення ефективності напівчистої токарної обробки прокатних валків повинно мати комплексний характер та передбачати забезпечення високих показників стійкості різців та енергоефективності процесу обробки при дотриманні жорстких вимог до технологічних характеристик деталей. Наведені в даній статті результати досліджень належать до проблематики токарної обробки прокатних валків з великими діаметрами бочки.

Аналіз досліджень та публікацій з проблеми, що розглядається

Валки прокатних станів з великими діаметрами бочки валка є характерними деталями важкого машинобудування. Приклади характеристик деяких сталевих валків прокатних станів виробництва ПАТ НКМЗ (м. Краматорськ) з великими діаметрами бочки валка (за даними роботи [1]) наведені в таблиці 1. У структурі технологічних процесів виготовлення подібних деталей переважає токарна обробка на важких та великих верстатах, причому близько 70 % часу витрачається на точіння зовнішніх циліндричних поверхонь [2].

Таблиця 1 – Характеристики деяких валків прокатних станів виробництва ПАТ НКМЗ (м. Краматорськ) (за даними роботи [1])

Габаритні розміри валків (діаметр бочки×довжина бочки×довжина деталі), мм	Маса валків, т	Матеріал валків	Твердість бочки та шийок	Точність валків	Шорсткість поверхні
1600×2700×6700 1500×2500×6300 1400×2000×5500 1200×1200×5000 1100×1500×4800	12–60	Сталь 50, 50ХН, 60ХН, 75Х2МФ, 75ХМФ, 90ХФ, 70ХЗГНМФ та ін.	Бочки та шийок до <i>HB</i> 320; бочки від <i>HSD</i> 60 до <i>HSD</i> 85; шийок від <i>HSD</i> 30 до <i>HSD</i> 55	Биття бочки та шийок від 0,02 мм до 0,005 мм	Від R_a 3,2 мкм до R_a 0,4 мкм

Аналіз виробничої технології токарної обробки сталевих прокатних валків з великими діаметрами бочки валка дозволив виділити її основні специфічні особливості, зокрема:

- значні величини та нерівномірний характер припуску на обробку, що обумовлює високі силові навантаження в зоні різання;

- технологічні проблеми, обумовлені невисоким рівнем оброблюваності багатьох з використовуваних у якості матеріалу валка сталей;

- значна довжина бочки валка, при якій тривалість обточування циліндричної поверхні бочки на прохід може значно перевищувати період стійкості різальної пластини, що ускладнює або унеможливує обробку бочки за один прохід без заміни пластини;

- великі значення потужності електродвигуна привода головного руху (ПГР) верстата, що обумовлює високий рівень абсолютних витрат (втрат) енергії при заданому значенні питомих витрат (втрат);

- великі втрати електроенергії при роботі електродвигуна ПГР верстата на холостому ході під час заміни різальної пластини (різцевого блоку) внаслідок відмови.

Одним з найперспективніших напрямів підвищення ефективності процесів механічної обробки є використання різальних інструментів зі зносостійкими покриттями [3–7]. Твердосплавні різальні інструменти зі зносостійким покриттям широко використовуються при чистовій обробці деталей, в тому числі у важкому машинобудуванні. Разом з тим, різці з твердосплавними різальними пластинами зі зносостійким покриттям знаходять все ширше використання і при напівчистовій, і навіть при чорновій токарній обробці деталей важкого машинобудування, у тому числі прокатних валків з великими діаметрами бочки валка [8–10].

Огляд невирішених частин проблеми

В наш час підприємства важкого машинобудування мають широкий вибір твердосплавних інструментів зі зносостійкими покриттями різних фірм-виробників. Разом з тим, сфера раціонального використання кожної конкретної марки твердого сплаву з покриттям дуже обмежена. Для напівчистової токарної обробки прокатних валків з великими діаметрами бочки використовують тверді сплави з покриттям, що входять до груп використання P05–P15 (рідше P20–P30) за стандартом ISO 513. Втім, далеко не всі марки твердих сплавів з перерахованих груп використання демонструють задовільні результати роботи у реальних виробничих умовах. Вказані обставини вимагають проведення стійкісних випробувань різців з твердосплавними різальними пластинами зі зносостійкими покриттями різних фірм-виробників, на підставі результатів яких мають бути сформульовані рекомендації з раціонального вибору та використання досліджуваних марок твердих сплавів.

Мета статті – аналіз результатів стійкісних випробувань токарних різців з твердосплавними різальними пластинами зі зносостійкими покриттями різних фірм-виробників при напівчистовій обробці сталевих валків прокатних станів з великими діаметрами бочки та формування рекомендацій з раціонального вибору марок твердих сплавів для досліджуваної області обробки.

Основна частина

Для досягнення поставленої мети досліджень на базі ПАТ НКМЗ (м. Краматорськ) були проведені стійкісні випробування токарних різців з твердосплавними різальними пластинами відомих фірм-виробників («Sandvik Coromant», «Pramet», «Stellram», «Iscar», «Toshiba Tungaloy», «Mitsubishi») при поздовжньому напівчистовому точінні валків прокатних станів у діапазоні діаметрів бочки 521...1300 мм (матеріали валків – леговані сталі 90ХФ, 70ХЗГНМФ, 65Х2С3М) (основні результати проведених випробувань були систематизовані у роботі [10]). Випробувані різці оснащувались різальними пластинами форми CNMG 190616 різних конструктивних виконань. Склад зносостійкого покриття, властивості та належність твердого сплаву до груп використання за стандартом ISO 513 для досліджуваних марок твердих сплавів визначались за інформацією каталогів фірм-виробників та електронних ресурсів [11–15]. Режими різання відповідали напівчистовій обробці валків прокатних станів заданого розмірного діапазону. Використовувалась загальноприйнята методика випробувань. Випробування припинялись при досягненні часу роботи різця, що дорівнює 15 хвилинам, або ж при досягненні критичного зносу різальної пластини, якщо він настає менш ніж за 15 хвилин роботи різця.

Умови проведення та результати стійкісних випробувань досліджуваних різців при обробці різних прокатних валків наведені в таблицях 2-5. Марка твердого сплаву в цих таблицях вказується в кінці умовного позначення різальної пластини.

Аналіз результатів стійкісних випробувань показав, що найменша інтенсивність зношування інструменту при напівчистовому точінні прокатного валка зі сталі 90ХФ з діаметром бочки валка \varnothing 1254 мм (таблиця 2) спостерігається у різальній пластині CNMG 190616-QM GC4005 (виробник – «Sandvik Coromant»), знос якої за підсумками 15 хвилин роботи різця склав 0,25 мм, і у пластини CNMG 190616-PR GC4225 того ж виробника, знос якої за підсумками 15 хвилин роботи різця склав 0,3 мм. Інтенсивніше зношувалась різальна пластина CNMG 190616E-M 6610 (виробник – «Pramet»); величина її зносу за 15 хвилин роботи склала 0,34 мм. Інші досліджувані різальні пластини досягли критичного зносу менш ніж за 15 хвилин роботи різця; їхні стійкісні характеристики на даному етапі досліджень не можуть бути визнані задовільними.

Таблиця 2 – Результати стійкісних випробувань токарних різців з твердосплавними пластинами різних фірм-виробників при поздовжньому напівчистовому точінні прокатного валка $\varnothing 1254$ мм зі сталі 90ХФ

Умови проведення стійкісних випробувань			
Оброблювана деталь, діаметр бочки валка		Валок прокатного стану, $\varnothing 1254$ мм	
Матеріал оброблюваної деталі (твердість)		Сталь 90ХФ (НВ 240)	
Режими різання		$t = 2,0-4,0$ мм, $S = 0,4$ мм/об, $n = 38$ об/хв, $V = 150$ м/хв	
Різальний інструмент	Тримач різця	PCBNL 3232 R19	
	Різальна пластина (фірма-виробник)	CNMG 190616-PR GC4225 («Sandvik Coromant»)	
		CNMG 190616-PM GC4025 («Sandvik Coromant»)	
		CNMG 190616-QM GC4005 («Sandvik Coromant»)	
		CNMG 190616E-M 6630 («Pramet»)	
		CNMG 190616E-M 6610 («Pramet»)	
		CNMG 190616-TH T9025 («Toshiba Tungaloy»)	
		CNMG 190616-TH T5020 («Toshiba Tungaloy»)	
		CNMG 190616-4T NL25 («Stellram»)	
Результати стійкісних випробувань			
Фірма-виробник різальної пластини	Різальна пластина	Час роботи, хв	Знос різальної пластини, мм
«Sandvik Coromant»	CNMG 190616-QM GC4005	15	0,25
«Pramet»	CNMG 190616E-M 6610	15	0,34
«Sandvik Coromant»	CNMG 190616-PR GC4225	15	0,3
«Stellram»	CNMG 190616-4T NL25	14,45	Критичний знос
«Toshiba Tungaloy»	CNMG 190616-TH T5020	13,85	
«Sandvik Coromant»	CNMG 190616-PM GC4025	13,63	
«Toshiba Tungaloy»	CNMG 190616-TH T9025	7,87	
«Pramet»	CNMG 190616E-M 6630	7,63	

При напівчистовому точінні прокатного валка зі сталі 70ХЗГНМФ з діаметром бочки валка $\varnothing 1300$ мм (таблиця 3) всі досліджувані різальні пластини продемонстрували високу інтенсивність зношування, досягнувши критичного зносу менш ніж за 10 хвилин роботи різця. Серед іншого це пояснюється низькою оброблюваністю сталі 70ХЗГНМФ у порівнянні

Таблиця 3 – Результати стійкісних випробувань токарних різців з твердосплавними пластинами різних фірм-виробників при поздовжньому напівчистовому точінні прокатного валка $\varnothing 1300$ мм зі сталі 70X3ГНМФ

Умови проведення стійкісних випробувань			
Оброблювана деталь, діаметр бочки валка		Валок прокатного стану, $\varnothing 1300$ мм	
Матеріал оброблюваної деталі (твердість)		Сталь 70X3ГНМФ (HB 260...300)	
Режими різання		$t = 2,0-7,0$ мм, $S = 0,4$ мм/об, $n = 40$ об/хв, $V = 163,4$ м/хв	
Різальний інструмент	Тримач різця	PCBN R19 (ламельний блок супорта для верстатів з ЧПК)	
	Різальна пластина (фірма-виробник)	CNMG 190616-PR GC4225 («Sandvik Coromant»)	
		CNMG 190616-NR 907 («Iscar»)	
		CNMG 190616-MH UE6020 («Mitsubishi»)	
		CNMG 190616E-NR 6620 («Pramet»)	
Результати стійкісних випробувань			
Фірма-виробник різальної пластини	Різальна пластина	Час роботи, хв	Знос різальної пластини, мм
«Sandvik Coromant»	CNMG 190616-PR GC4225	9,18	Критичний знос
«Pramet»	CNMG 190616E-NR 6620	8,2	
«Iscar»	CNMG 190616-NR 907	5,7	
«Mitsubishi»	CNMG 190616-MH UE6020	4,5	

зі сталлю 90ХФ. Більш низьку у порівнянні з іншими різальними пластинами інтенсивність зношування продемонстрували різальні пластини CNMG 190616-PR GC4225 виробництва фірми «Sandvik Coromant» (критичний знос настав через 9,18 хвилини) та CNMG 190616E-NR 6620 виробництва фірми «Pramet» (критичний знос настав через 8,2 хвилини).

Напівчистове точіння прокатного валка зі сталі 65X2C3M з діаметром бочки валка $\varnothing 521$ мм здійснювалось на двох різних комбінаціях режимів різання: $t = 3,0$ мм, $S = 0,3$ мм/об, $n = 100$ об/хв, $V = 164$ м/хв (таблиця 4) та $t = 1,0-6,0$ мм, $S = 0,4$ м/об, $n = 90$ об/хв, $V = 147$ м/хв (таблиця 5). Результати стійкісних випробувань різців знову свідчать про найменшу інтенсивність зношування у різальних пластин виробництва фірми «Sandvik Coromant». У першому випадку знос пластини CNMG 190616-PM GC4015 за 15 хвилин роботи різця склав 0,22 мм. У другому випадку знос пластини CNMG 190616-PR GC4225 склав 0,7 мм за 15 хвилин роботи різця. Така значна величина зносу різальної пластини у другому випадку пояснюється,

Таблиця 4 – Результати стійкісних випробувань токарних різців з твердосплавними пластинами різних фірм-виробників при поздовжньому напівчистовому точінні прокатного валка $\varnothing 521$ мм зі сталі 65X2C3M (режими різання: $t = 3,0$ мм, $S = 0,3$ мм/об, $n = 100$ об/хв, $V = 164$ м/хв)

Умови проведення стійкісних випробувань			
Оброблювана деталь, діаметр бочки валка		Валок прокатного стану, $\varnothing 521$ мм	
Матеріал оброблюваної деталі (твердість)		Сталь 65X2C3M (HB 240)	
Режими різання		$t = 3,0$ мм, $S = 0,3$ мм/об, $n = 100$ об/хв, $V = 164$ м/хв	
Різальний інструмент	Тримач різця	PCBN R19 (ламельний блок супорта для верстатів з ЧПК)	
	Різальна пластина (фірма-виробник)	CNMG 190616-PM GC4015 («Sandvik Coromant»)	
		CNMG 190616E-M 6610 («Pramet»)	
		CNMG 190616-4T NL25 («Stellram»)	
		CNMG 190616-2N NL25 («Stellram»)	
Результати стійкісних випробувань			
Фірма-виробник різальної пластини	Різальна пластина	Час роботи, хв	Знос різальної пластини, мм
«Sandvik Coromant»	CNMG 190616-PM GC4015	15	Критичний знос
«Pramet»	CNMG 190616E-M 6610	11,5	
«Stellram»	CNMG 190616-4T NL25	10	
«Stellram»	CNMG 190616-2N NL25	6,73	

серед іншого, інтенсивними режимами різання та невисокими показниками оброблюваності сталі 65X2C3M. Інші досліджувані при точінні цієї сталі різальні пластини досягли критичного зносу менш ніж за 15 хвилин роботи різця; їхні стійкісні характеристики на даному етапі досліджень не можуть бути визнані задовільними.

Визначальним фактором, що впливає на інтенсивність зношування інструменту при напівчистовій токарній обробці сталевих прокатних валків, в нашому випадку є властивості використовуваних марок твердих сплавів. Узагальнююча оцінка показників інтенсивності зношування досліджуваних різальних пластин при напівчистовому точінні бочок прокатних валків з різних сталей, а також критичний аналіз інформації джерел [11–15] дозволили виділити у якості перспективних наступні марки твердих сплавів:

– твердий сплав GC4225 виробництва фірми «Sandvik Coromant», що має міцну градієнтну структуру та зносостійке покриття, отримане методом CVD,

Таблиця 5 – Результати стійкісних випробувань токарних різців з твердосплавними пластинами різних фірм-виробників при поздовжньому напівчистовому точінні прокатного валка $\varnothing 521$ мм зі сталі 65X2C3M (режими різання: $t = 1,0\text{--}6,0$ мм, $S = 0,4$ мм/об, $n = 90$ об/хв, $V = 147$ м/хв)

Умови проведення стійкісних випробувань			
Оброблювана деталь, діаметр бочки валка		Валок прокатного стану, $\varnothing 521$ мм	
Матеріал оброблюваної деталі, твердість		Сталь 65X2C3M (HB 240)	
Режими різання		$t = 1,0\text{--}6,0$ мм, $S = 0,4$ мм/об, $n = 90$ об/хв, $V = 147$ м/хв	
Різальний інструмент	Тримач різця	PCBN R19 (ламельний блок супорта для верстатів з ЧПК)	
	Різальні пластини (фірма- виробник)	CNMG 190616-PR GC4225 («Sandvik Coromant»)	
		CNMG 190616E-M 6630 («Pramet»)	
		CNMG 190616-4T NL25 («Stellram»)	
		CNMG 190616-4T NL30 («Stellram»)	
		CNMG 190616-4T NL40 («Stellram»)	
Результати стійкісних випробувань			
Фірма-виробник різальної пластини	Різальна пластина	Час роботи, хв	Знос різальної пластини, мм
«Sandvik Coromant»	CNMG 190616-PR GC4225	15	0,7
«Stellram»	CNMG 190616-4T NL25	14,83	Критичний знос
«Pramet»	CNMG 190616E-M 6630	5,78	
«Stellram»	CNMG 190616-4T NL40	3,5	

відрізняється універсальністю та може працювати у широкому діапазоні умов різання від чистової до чорнової обробки деталей зі сталі та сталевого литва, в тому числі і в умовах переривчастого різання (група використання P10–P40; найкращі результати роботи твердого сплаву відповідають групі використання P25);

– твердий сплав GC4005 виробництва фірми «Sandvik Coromant», що має тверду основу з тонким градієнтним шаром на периферії пластини та з покриттям $\text{TiCN-Al}_2\text{O}_3\text{-TiCN}$ загальною товщиною 18 мкм, отриманим методом CVD (тверда основа з тонким градієнтним шаром на периферії пластини надає різальній кромці підвищену точність, забезпечуючи здатність до опору лункоутворенню на передній поверхні та пластичній деформації);

– твердий сплав GC4015 виробництва фірми «Sandvik Coromant» зі зносостійким покриттям TiCN–Al₂O₃–TiN загальною товщиною 14 мкм, отриманим методом CVD (група використання P10–P20, найкращі результати роботи твердого сплаву відповідають групі використання P15);

– твердий сплав 6610 виробництва фірми «Pramet» з товстим зносостійким покриттям з несівним шаром Al₂O₃, нанесеним методом MT–CVD на функціонально градієнтному субстраті з низьким вмістом кобальту (група використання P10–P25).

Призначення раціональних режимів напівчистового точіння сталевих прокатних валків з великими діаметрами бочки валка різцями, оснащеними різальними пластинами вказаних марок твердих сплавів, не може базуватися лише на рекомендаціях фірм-виробників та результатах стійкісних випробувань різців. Висока енергомісткість токарної обробки прокатних валків з великими діаметрами бочки вимагає використання енергоефективних технологічних параметрів обробки, визначення яких може здійснюватись на базі стратегії, запропонованої у роботі [16].

Висновки

В статті представлені результати проведених на базі ПАТ НКМЗ стійкісних випробувань токарних різців з твердосплавними різальними пластинами зі зносостійкими покриттями провідних фірм-виробників при напівчистовій обробці валків прокатних станів з великими діаметрами бочки валка. За результатами випробувань визначені марки твердих сплавів, найбільш перспективні для використання в досліджуваній області обробки.

Перелік використаних джерел: 1. *Васильченко, Я. В.* Разработка технологических систем для обработки крупногабаритных деталей на базе адаптивных многоцелевых тяжелых станков / *Я. В. Васильченко, Т. А. Сукова, М. В. Шаповалов* // Вісник СевНТУ. Зб. наук. пр. Серія : Машиноприладобудування та транспорт. Севастополь : СевНТУ. – 2013. – Вип. 139. – С. 28–32. 2. *Мироненко, Е. В.* Научные основы создания систем агрегатно-модульных инструментов для тяжелых токарных станков : дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01. / *Е. В. Мироненко* ; Донбасская гос. машиностроительная академия. – Краматорск, 2003. – 417 с. 3. *Верецака, А. С.* Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / *А. С. Верецака*. – М. : Машиностроение, 1993. – 336 с. – ISBN 5-217-01482-2. 4. *Верецака, А. С.* Методологические принципы создания функциональных покрытий для режущего инструмента / *А. С. Верецака, С. Н. Григорьев, В. П. Табаков* // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 3. – С. 18–39. 5. *Табаков, В. П.* Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента / *В. П. Табаков*. – М. : Машиностроение, 2008. – 311 с. 6. *Мацевитый, В. М.* Покрyтия для режущих инструментов / *В. М. Мацевитый*. – Х. : Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1987. – 128 с. 7. *Костюк, Г. И.* Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем : справочник / *Г. И. Костюк*. – К. : Антикава, 2003. – 412 с. – ISBN 966-8105-21-4. 8. *Соловьев, В. В.* Применение пластин с покрытиями при черновом точении на тяжелых токарных станках / *В. В. Соловьев, Е. В. Мироненко, В. С. Гузенко* // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия : Инженерные исследования. – № 3. – 2010. – С. 54–59. 9. *Мироненко, Е. В.* Оптимизация режимов резания при обработке на тяжелых токарных станках с учетом энергозатрат / *Е. В. Мироненко, В. С. Гузенко, Л. В. Васильева, О. Е. Мироненко* // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск : Технології в машинобудуванні. Харків : НТУ «ХПІ». – 2010. – № 40. – С. 62–70. 10. *Мироненко, Е. В.* Применение

резцов с твердосплавными режущими пластинами с износостойкими покрытиями при получистовой обработке валков прокатных станов / *Е. В. Мироненко, В. С. Гузенко, В. В. Калинин, В. В. Носков* // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Криворізьк, вип. № 37, 2015. – С. 32–39. **11.** Pramet. Токарная обработка. – 2009. – 321 с. **12.** Руководство Sandvik Coromant по обработке металлов резанием. – 2005. – 564 с. **13.** Stellram. An Allegheny Technologies Company. Токарный инструмент. [Электронный ресурс] / Stellram. An Allegheny Technologies Company. Токарный инструмент. Режим доступа http://www.pgroup.com.ua/img/catalog/tverdosplav/Turning_ru.pdf. **14.** ISCAR. Общий каталог токарного инструмента. Russian version. – 2008. – 42 с. **15.** Как получить информацию о токарных пластинах. [Электронный ресурс] / Как получить информацию о токарных пластинах. Режим доступа http://static.tverdysplav.ru/docs/Mitsubishi/Mitsubishi_plastini_dlya_toch.pdf. **16.** *Мироненко, Е. В.* Стратегия определения энергоэффективных технологических параметров токарной обработки деталей тяжелого машиностроения / *Е. В. Мироненко, В. В. Калинин* // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2016. – Вып. 86. – С. 83–95.

Bibliography (transliterated): **1.** *Vasilchenko, Ya. V.* Razrabotka tehnologicheskikh sistem dlia obrabotki krupnogabaritnykh detalej na baze adaptivnykh mnogocelevykh tiazhelykh stankov / *Ya. V. Vasilchenko, T. A. Sukova, M. V. Shapovalov* // Visnyk SevNTU. Zb. nauk. pr. Serija : Mashynopryladobuduvannia ta transport. Sevastopol : SevNTU. – 2013. – Vyp. 139. – S. 28–32. **2.** *Mironenko Ye. V.* Nauchnyje osnovy sozdaniia sistem agregatno-modul'nykh instrumentov dlia tiazhelykh tokarnykh tankov : dis. ... d-ra tehn. nauk : 05.03.01. / *Ye. V. Mironenko* : Donbasskaja gosudarstvennaja mashinostroitel'naja akademija. – Kramatorsk, 2003. – 417 s. **3.** *Vereshchaka, A. S.* Rabotosposobnost' rezhushchego instrumenta s iznosostojkimi pokrytjiami / *A. S. Vereshchaka*. – M. : Mashinostrojenije, 1993. – 336 s. – ISBN 5-217-01482-2. **4.** *Vereshchaka, A. S.* Metodologicheskije principy sozdaniia funkcionalnykh pokrytij dlia rezhushchego instrumenta / *A. S. Vereshchaka, S. N. Grigorjev, V. P. Tabakov* // Uprochniajushchije tehnologii i pokrytija. – 2013. – № 3. – S. 18–39. **5.** *Tabakov, V. P.* Formirovanije iznosostojkikh ionno-plazmennyykh pokrytij rezhushchego instrumenta / *V. P. Tabakov*. – M. : Mashinostrojenije, 2008. – 311 s. **6.** *Macevityj, V. M.* Pokrytija dlia rezhushchih instrumentov / *V. M. Macevityj*. – H. : Vyscha shk. Izd-vo pry Har'k. un-te, 1987. – 128 s. **7.** *Kostiuk, G. I.* Effektivnij rezhushchij instrument s pokrytjem i uprochnennym slojem : spravocnik / *G. I. Kostiuk*. – K. : Antikva, 2003. – 412 s. – ISBN 966-8105-21-4. **8.** *Solovjev, V. V.* Primenenije plastin s pokrytjiami pri chernovom tochenii na tiazhelykh tokarnykh stankah / *V. V. Solovjev, Ye. V. Mironenko, V. S. Guzenko* // Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov. Serija : Inzhenernyje issledovanija. – № 3. – 2010. – S. 54–59. **9.** *Mironenko, Ye. V.* Optimizacija rezhimov rezanija pri obrabotke na tiazhelykh tokarnykh stankah s uchetom energozatrat / *Ye. V. Mironenko, V. S. Guzenko, L. V. Vasiljeva, O. Ye. Mironenko* // Visnyk Nacionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkiv's'kyj politekhnichnyj instytut». Zbirnyk naukovykh prac'. Tematychnyj vypusk : Tekhnolohiji v mashynobuduvanni. Kharkiv : NTU «KhPI». – 2010. – № 40. – S. 62–70. **10.** *Mironenko, Ye. V.* Primenenije rezcov s tverdosplavnymi rezhushchimi plastinami s iznosostojkimi pokrytjiami pri poluchistovoj obrabotke valkov prokatnykh stanov / *Ye. V. Mironenko, V. S. Guzenko, V. V. Kalinichenko, V. V. Noskov* // Nadijnist' instrumentu ta optymizacija tekhnolohichnykh sistem». Zbirnyk naukovykh prac'. – Kramators'k, vyp. № 37, 2015. – S. 32–39. **11.** Pramet. Tokarnaja obrabotka. – 2009. – 321 s. **12.** Руководство Sandvik Coromant по обработке металлов резанием. – 2005. – 564 с. **13.** Stellram. An Allegheny Technologies Company. Tokarnyj instrument. [Elektronnyj resurs] / Stellram. An Allegheny Technologies Company. Tokarnyj instrument. Rezhim dostupa http://www.pgroup.com.ua/img/catalog/tverdosplav/Turning_ru.pdf. **14.** ISCAR. Obshchij katalog tokarnogo instrumenta. Russian version. – 2008. – 42 s. **15.** Как полuchit' informaciju o tokarnykh plastinah. [Elektronnyj resurs] / Как полuchit' informaciju o tokarnykh plastinah. Rezhim dostupa http://static.tverdysplav.ru/docs/Mitsubishi/Mitsubishi_plastini_dlya_toch.pdf. **16.** *Mironenko, Ye. V.* Strategija opredelenija energoeffektivnykh tehnologicheskikh parametrov tokarnoj obrabotki detalej tiazhelego mashinostrojenija / *Ye. V. Mironenko, V. V. Kalinichenko* // Rezanije I instrument v tehnologicheskikh sistemah : Mezhdukar. nauch.-than. sb. – Har'kov : NTU «HPI». – 2016. – Vyp 86. – S. 83–95.

УДК 006.91:004.942

В.М. ТОНКОНОГИЙ, д-р техн. наук,
І.В. ПРОКОПОВИЧ, д-р техн. наук,
М.О. ДУХАНИНА,
В.В. ДОБРОВОЛЬСЬКА, Одеса, Україна

МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕНОСУ В МАШИНОБУДІВНИХ ДЕТАЛЯХ ІЗ ГЕТЕРОГЕННИХ МАТЕРІАЛІВ

Важливим етапом виготовлення гетерогенних матеріалів із суттєвою різницею властивостей окремих компонентів, на якому закладається якість майбутніх виробів, є заповнення рідкою частиною суміші формообразуючої оснастки. Пряме вимірювання щільності виробів конче необхідне як в системах управління процесом заповнення, так і при технічному контролі. Запропоновано та практично реалізований смісний метод вимірювання щільності матеріалів подібного типу.

Ключові слова: гетерогенні матеріали, вимірювання щільності матеріалів

Важным этапом изготовления гетерогенных материалов с существенной разницей свойств отдельных компонентов, на котором закладывается качество будущих изделий, является заполнение жидкой частью смеси формообразующей оснастки. Прямое измерение плотности изделий крайне необходимо как в системах управления процессом заполнения, так и при техническом контроле. Предложен и практически реализован емкостный метод измерения плотности материалов подобного типа.

Ключевые слова: гетерогенные материалы, измерения плотности материалов

An important step in the manufacture of heterogeneous materials with a significant difference of properties of the individual components, which includes the quality of future products, is to fill the liquid part of the mix snap which forms form . Direct density measurement products are extremely necessary as in the management systems process for filling and inspection. Proposed and practically implemented by a capacitive method of measuring the density of materials of this type.

Keywords: heterogeneous materials, measuring the density of materials

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науково- практичними завданнями

Значна кількість продукції сучасних підприємств отримується затвердінням із рідкого (пластмаси) або псевдо рідкого (ливарні форми, бетонні вироби, синтегран) стану. Основним етапом таких технологій є заповнення формоутворюючої оснастки відповідною сумішшю. На цьому етапі створюється не тільки конфігурація та властивості майбутнього виробу, але й закладаються передумови майбутньої якості останнього: щільність, рівномірність розподілу компонентів, наявність або відсутність раковин і т.п., що потребує постійного моніторингу за плином заповнення.

Особливо актуальним виглядає такий моніторинг, коли в тілі виробу наявна будь-яка арматура: прутки, пластини, решітки, тощо. Адже вони встановлюються в оснастку до заливання і суттєво йому перешкоджають.

Контролювати процес заливання в цьому випадку особливо важко, особливо тоді, коли в якості, наприклад, залізобетонного виробу виступає великогабаритна опора ЛЕП, гребля ГЕС та інші, габарити яких сягають десятків та сотень метрів. В таких випадках руйнівний контроль готових виробів неприпустимий, а відповідальність за стан залізобетонної продукції дуже висока.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Після виготовлення арматури та її контролю подальший результат технологічного процесу залежить виключно від якості заповнення оснастки бетонною сумішшю та твердіння останньої. Найголовніший контролюємий параметр, від якого залежать, насамперед, механічні властивості опори, – це щільність бетону в виробі [1, 2].

Проаналізуємо проблему на прикладі технологічного процесу виготовлення залізобетонних опор ЛЕП. Для початку такого аналізу достатньо подивитися, як виглядає готова арматура перед її укладанням в формуотворюючу оснастку (рис. 1).

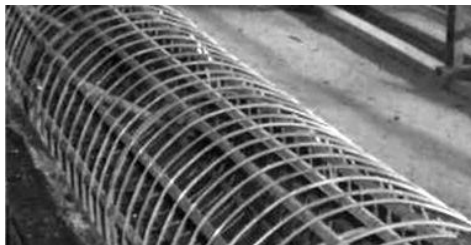


Рисунок 1 – Металева арматура перед заповненням бетонною сумішшю
Зовнішній діаметр такої «клітки» дорівнює приблизно 0,7 м, а густина її решітки може стати на заваді заповнення оснастки бетоном, навіть з урахуванням додаткових до гравітації відцентрових сил

Безпосереднє вимірювання щільності під час обертання важко здійснювати навіть сучасними методами [3, 4]. Це пов'язано також із тим, що в початковій бетонній суміші присутня вода – електричний провідник, яка може суттєво і непередбачувано впливати на показання приладу, який вимірює електричні характеристики [5].

Найбільш перспективним на перший погляд виглядає ємнісний метод вимірювання, заснований на однозначній відповідності між щільністю матеріалу та його ємністю [6].

Для геометрично ідеальних випадків ємність плоского конденсатора може бути розрахована за формулою [7]:

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{S}{l}, \quad (1)$$

ємність циліндричного конденсатора:

$$C = 2\pi\varepsilon\varepsilon_0 \frac{L}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}, \quad (2)$$

ємність сферичного конденсатора:

$$C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)^{-1}, \quad (3)$$

де: C – ємність конденсатора, Ф; ε – відносна діелектрична проникність; ε_0 – електрична постійна, $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{А}^2$; S – площа однієї обкладки, м^2 ; l – відстань між обкладками, м; L – довжина циліндра, м; R_1, R_2 – радіуси, відповідно внутрішній та зовнішній, м.

Для конкретного плоского конденсатора значення величини S і l суть постійні, і має місце однозначна залежність між ємністю і діелектричною проникністю простору між його обкладками. Якщо матеріал, що заповнює простір, неоднорідний і являє собою багатозфазну систему, то значення ε буде залежати від діелектричної проникності всіх фаз і процентного (масового) їх співвідношення [8].

Якщо в якості заповнювача проміжку між пластинами конденсатора розглядати бетон, сумарна діелектрична проникність останнього буде визначатися проникністю повітря пор і порожнин, зв'язуючого цементу, наповнювального піску та гравію (тобто величинами постійними в межах даного експерименту) і співвідношенням мас перерахованих компонентів, тобто, в кінцевому підсумку, щільністю даної ділянки залізобетонного виробу.

Мета роботи

Метою роботи є підвищення якості виробництва та зменшення відсотку бракованих виробів при виготовленні циліндричних залізобетонних центрифугованих стійок для опор високовольтних ліній електропередач шляхом розробки та впровадження метрологічного забезпечення для контролю щільності бетонної частини таких стійок електроємнісним

методом.

Для досягнення цієї мети в роботі були висунуті та розв'язані такі задачі: розроблені теоретичні основи ємнісного вимірювання щільності бетону в залізобетонних трубчастих конструкціях, створено стенд для вимірювання щільності бетону, розроблено систему контролю якості продукції, виконані практичні випробування результатів дослідження з позитивним техніко-економічним ефектом.

Викладення основного матеріалу

Розробка теоретичних основ ємнісного вимірювання щільності залізобетону трубчастих конструкцій.

Систематичний виробничий контроль щільності бетонної частини залізобетонних виробів ускладнений через відсутність ефективних методів такого контролю без руйнування виробу. Нагадаємо, що довжина опор ЛЕП сягає 20 метрів при діаметрі 0,8 м!

Метод, запропонований в даній роботі, полягає у безпосередньому вимірюванні електричної ємності конденсатора, одна з обкладок якого є поверхня арматури виробу (див. рис. 1), а друга – поверхню рухомої частини стенду для вимірювання ємності. Такий підхід дозволяє забезпечити відносно стабільні геометричні параметри конденсатора і високу точність вимірювань.

Для тарування вимірювального приладу безпосередньо в розмірності щільності (кг/м^3) для конкретних сумішей і конкретних умов вимірювання була виготовлена калібрувальна установка, яка складалася з конденсатора з параметрами: $S = 0,01 \text{ м}^2$; $l = 0,08 \text{ м}$; та вимірювача прецизійного LCR-821; діапазон вимірювання ємності: 0,00001 пФ – 99999 мкФ.

Ємність такої установки складається з вхідної ємності вимірювального приладу $C_{\text{вх}}$, ємності сполучних проводів $C_{\text{пр}}$ і власне ємності плоского каліброваного конденсатора $C_{\text{к}}$:

$$C_y = C_{\text{вх}} + C_{\text{пр}} + C_{\text{к}}. \quad (4)$$

Значення $C_{\text{вх}}$ і $C_{\text{пр}}$ є постійними для конкретного дослідження і визначаються безпосереднім вимірюванням при відключеному конденсаторі. Перед проведенням обчислень величину $C_{\text{вх}} + C_{\text{пр}}$ віднімали від вимірюваного значення C_y . В табл. 1 представлені значення щільності отриманих зразків і обчислені за формулою (4) ємності конденсатора, в якому при вимірюванні зразки виконували роль діелектрика.

Обробка отриманих даних з урахуванням конкретних розмірів калібрувального конденсатора дозволила отримати вираз для обчислювати середню щільність досліджуваного фрагмента бетону, якщо відома ємність конденсатора C , а також площа його обкладинок S та відстань між ними l .

$$d = 93 \cdot 10^{12} \text{ ClS}^{-1} - 774. \quad (5)$$

Достовірність формули підтверджується практичним збігом значень C для випадків розрахунку за формулою (5) при підстановці $d = 0$, $S = 0,01$; $l = 0,02$; розрахунком за формулою (4) при підстановці діелектричної проникності повітря $\epsilon_n=1,00059$ і безпосереднім вимірюванням на калібрувальній установці при відсутності між обкладками зразка (табл. 2).

Оцінку похибки вимірювання за рахунок порушення конфігурації конденсатора здійснювали окремо за двома параметрами взаємного розташування обкладинок.

Відсоток помилки при неточності в установці відстані між обкладинками l на величину Δl визначали за формулою:

$$\frac{\Delta C}{C} (\%) = \frac{100 \Delta l}{l + \Delta l}, \quad (6)$$

а відсоток помилки вимірювання від взаємної непаралельності обкладок за формулою:

Таблиця 1 – Залежність ємності конденсатора від щільності зразка

№№ зразка	Параметри зразка		Значення параметрів	
	m , кг	d , кг/м ³	$C_k \times 10^{12}$, Ф	ϵ
Повітря	-	-	2.21	1,00059
1	1,6224	2028	5.54	2,50831
2	1,6448	2056	5.57	2,52274
3	1,6584	2073	5.77	2,61410
4	1,6736	2092	5.83	2,64134
5	1,6808	2101	5.84	2,64535
6	1,7384	2173	5.9	2,67099
7	1,7552	2194	5.97	2,70465
8	1,7768	2221	6.00	2,71747
9	1,7968	2246	6.05	2,74071
10	1,8200	2275	6.06	2,74710
11	1,8344	2293	6.07	2,74873
12	1,8424	2303	6.11	2,76556
13	1,8664	2333	6.17	2,79360
14	1,9000	2375	6.21	2,81204
15	1,9184	2398	6.27	2,83768
16	1,9496	2437	6.33	2,86493
17	1,9712	2464	6.38	2,88656
18	1,9888	2486	6.43	2,90980
19	2,0136	2517	6.53	2,95548
20	2,0288	2536	6.68	3,02360

Таблиця 2 – Помилки вимірювання ємності різними методами

Визначення	За формулою (4)	За формулою (5)	Безпосереднє
Значення C , Ф	$2.217 \cdot 10^{-12}$	$2.199 \cdot 10^{-12}$	$2.21 \cdot 10^{-12}$
% помилки	-	0.81	0.03

$$\frac{\Delta C}{C} (\%) = 100 \left(1 - \int_{-l/2}^{l/2} \frac{dx}{l + x \operatorname{tg} \alpha} \right) = 100 \left(1 - \frac{l \operatorname{ctg} \alpha}{r} \ln \frac{2l + r \operatorname{tg} \alpha}{2l - r \operatorname{tg} \alpha} \right), \quad (7)$$

де: r – розмір обкладки в площині перекосу;

α – кут між обкладками.

Розраховані за формулами (6) та (7) похибки при стандартних допусках на розмір H і кут α навіть по шостого класу точності не перевищують 2 – 3%.

На жаль, конфігурація реальних обкладок в конденсаторі, створеному на тлі поверхонь внутрішньої арматури, дуже далека від площини, циліндру або сфери (див. рис. 1). Тому розглянемо обидві його обкладки як деякі криволінійні поверхні (рис. 2), описані функціями вигляду $y_1(x_1^{k_1}, x_2^{k_2})$ та $y_2(x_1^{k_3}, x_2^{k_4})$, причому, жодна степінь при аргументах не дорівнює одиниці.

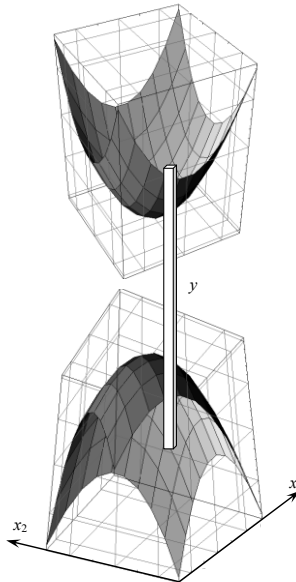


Рисунок 2 – Схема до розрахунку електричної ємності між двома криволінійними поверхнями

Хай поверхні $y_1(x_1^{k1}, x_2^{k2})$ та $y_2(x_1^{k3}, x_2^{k4})$, ємність між якими обчислюється, описуються виразами:

$$\begin{cases} y_1 = x_1^2 + x_2^2; \\ y_2 = -x_1^2 - x_2^2 \end{cases} \quad (8)$$

при обмеженнях:

$$x_{1\min} \leq x_1 \leq x_{1\max}; \quad (9)$$

$$x_{2\min} \leq x_2 \leq x_{2\max}. \quad (10)$$

Тоді ємність між цими поверхнями в межах (9) та (10) можна приблизно обчислити як суму ємностей окремих конденсаторів (паралелепіпед на рис. 3). Спрямовуючи розміри x_1 та x_2 цього паралелепіпеда до нуля, отримуємо за допомогою подвійного інтегрування:

$$\begin{aligned} C &= \varepsilon\varepsilon_0 \int_{x_{1\min}}^{x_{1\max}} \int_{x_{2\min}}^{x_{2\max}} \frac{dx_1 dx_2}{|f_1(x_1, x_2) - f_2(x_1, x_2)|} = \varepsilon\varepsilon_0 \int_{x_{1\min}}^{x_{1\max}} \int_{x_{2\min}}^{x_{2\max}} \frac{1}{(x_1^2 + x_2^2) - (-x_1^2 - x_2^2)} dx_1 dx_2 = \\ &= \frac{1}{2} \varepsilon\varepsilon_0 \int_{x_{1\min}}^{x_{1\max}} \int_{x_{2\min}}^{x_{2\max}} \frac{1}{(x_1^2 + x_2^2)} dx_1 dx_2, \end{aligned} \quad (11)$$

виходячи з того, що останній подвійний інтеграл в (11) може бути обчислений за допомогою табличного [9, 10]:

$$\int \frac{du}{a^2 + u^2} = \frac{1}{a} \operatorname{arctg} \frac{u}{a} + c \quad (12)$$

Розробка стенда для вимірювання щільності залізобетону. На жаль, вираз (11), та ще й з врахуванням складностей, які випливають з його розв'язання за допомогою (12) та згаданої вище відмінності поверхні арматури від будь якої функції виду $y_1(x_1^{k1}, x_2^{k2})$, не може бути застосований для розрахунків залежності «ємність – щільність» на кшталт виразу (5) [11].

Тому в роботі було зроблено акцент на експериментальному виявленні меж ємності, які відповідають поняттю «якість». Для цього було розроблено стенд для вимірювання щільності бетону у великому залізобетонному виробі циліндричної форми (рис. 3).

Залізобетонна опора 1 розташовується на столі стенду. Вдвож опори співосно рухається пластмасове кільце 2, внутрішня поверхня якого вкрита шаром металу 3.

Арматура опори 4 і шар 3 утворюють між собою електричний

конденсатор, ємність якого вимірюється за допомогою приладу 6. В міру руху кільця 2 вздовж опори 1 прилад 6 запам'ятовує і виводить користувачеві залежність $C(x)$ (див. рис. 3). Якщо крива $C(x)$ знаходиться в межах між C_{\min} та C_{\max} , опора вважається такою, що позитивно пройшла випробування на щільність.

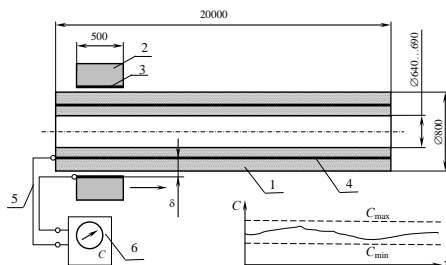


Рисунок 3 – Схема стелу для вимірювання щільності бетону у великому залізобетонному виробі циліндричної форми

Висновки

В результаті аналізу залежності «ємність електричного конденсатора – щільність гетерогенного матеріалу між його обкладками» розроблені теоретичні основи ємнісного вимірювання щільності бетону в великих трубчастих залізобетонних конструкціях. Створено стелу для вимірювання щільності бетону в трубчастих залізобетонних конструкціях великого розміру (до 20 м) із рухомим вздовж такої конструкції електродом, між поверхнею якого та арматурою залізобетону утворюється вимірюваний конденсатор. Розроблено метод підвищення якості стійок циліндричних залізобетонних центрифугованих опор для високовольтних ліній електропередач у вигляді системи управління параметрами процесу їхнього виготовлення з використанням нових засобів вимірювання.

Пропоноване метрологічне забезпечення було використано при створенні системи управління технологічним процесом виготовлення виробу «Стійка циліндрична залізобетонна центрифугована для опор високовольтних ліній електропередач напругою 750 кВ». Практичні випробування цієї системи на ПАТ «Галенергобудпром» дозволили отримати наступні результати: середня вартість одного придатного виробу знизилася на 13 %, а кількість бракованих виробів знизилася на 23 %.

Перспективи подальшого розвитку

Результати роботи підтверджують практичну можливість використання ємнісного методу вимірювання щільності окремих складових великих залізобетонних виробів.

Метод може бути застосований при управлінні технологічним процесом виготовлення таких виробів з оберненим зв'язком «по малому колу», коли вимірюються проміжні параметри процесу, а також «по великому колу», коли необхідні для управління дані отримуються на кінцевому етапі останнього.

Список використаних джерел: 1. *Снежков, Д.Ю.* Анализ методик неразрушающих испытаний бетонных конструкций по действующим государственным стандартам и нормам Евросоюза / *Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович и др.* // Строительство и архитектура. – 2013. – № 2. – С. 33-39. 2. *Ульбин, А. В.* Методы контроля параметров армирования железобетонных конструкций // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 1(27). – С. 4-13. 3. *Калужный, А.В.* Исследование методов контроля скрытых пустот различными способами // АСАУ, 2007. – № 10(30). – С. 54-62. 4. *Бербеков Ж.В.* Неразрушающие методы контроля прочности бетона // Молодой ученый. – 2012. – №11. – С. 20-23. 5. *Гольдштейн, А.Е.* Отстройка от влияния изменения электропроводности воды на результаты технологического контроля погонной емкости электрического кабеля / *А.Е. Гольдштейн, Г.В. Вавилов* // Ползуновский вестник. Раздел 4. Приборы и методы контроля. – 2013. – № 2. – С. 150-154. 6. *Становский, А.Л.* Неразрушающий метод измерения плотности фрагментов песчаных литейных форм / *А.Л. Становский, И.В. Прокопович и др.* // Збірник наукових праць. «Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві». – Херсон, 2013 – Вип 4(5). – С. 104-110. 7. Измерение параметров конденсаторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zpostbox.ru/izmerenie_parametrov_kondensatorov.html>. – 8.02.2017. 8. *Оборский, Г.А.* Выбор метрологического обеспечения управления сложными объектами литейного производства с трудноизмеримыми параметрами / *Г.А. Оборский, А. Л. Становский и др.* // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Информационные технологии. – Харьков, 2014. – № 6/3 (72). – С. 41-47. 9. *Бубняк, Т.І.* Вища математика. – Львів: Новий світ, 2009. – 436 с. 10. *Усов, А.В.* Дифференциальные та интегральные численна функцій багатьох змінних / *А.В. Усов, В.М. Кузьміна та ін.* – Одеса: Астропринт, 2007. – 245 с. 11. *Прокопович, І.В.* Метрологічне забезпечення контролю щільності гетерогенних матеріалів / *І.В. Прокопович, М.О. Духаніна та ін.* // Вісник НТУ «ХПБ»: Серія: «Механіко-технологічні системи та комплекси». – 2016. – № 50 (122). – С. 22-28.

Bibliography (transliterated): 1. *Snezhkov, D.Ju.* Analiz metodik nerazrushajushhij ispytaniy betonnykh konstrukcij po dejstvujushhim gosudarstvennym standartam i normam Evrosojuza / *D.Ju. Snezhkov, S. N. Leonovich i dr.* // Stroitel'stvo i arhitektura. – 2013. – № 2. – S. 33-39. 2. *Ulybin, A.V.* Metody kontrolja parametrov amirovanija zhelezobetonnykh konstrukcij // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. – 2012. – № 1(27). – S. 4-13. 3. *Kaluzhnyj, A.V.* Issledovanie metodov kontrolja skrytyh pustot razlichnymi sposobami // ASAU, 2007. – № 10(30). – S. 54-62. 4. *Berbekov Zh.V.* Nerazrushajushhie metody kontrolja prochnosti betona // Molodoj uchenyj. – 2012. – №11. – S. 20-23. 5. *Gol'dshtejn, A.E.* Ostrojka ot vlijanija izmenenija jelektroprovodnosti vody na rezul'taty tehnologicheskogo kontrolja pogonnoj emkosti jelektricheskogo kabelja / *A. E. Gol'dshtejn, G.V. Vavilov* // Polzunovskij vestnik. Razdel 4. Pribory i metody kontrolja. – 2013. – № 2. – S. 150-154. 6. *Stanovskij, A.L.* Nerazrushajushhij metod izmerenija plotnosti fragmentov peschanykh litejnykh form / *A.L. Stanovskij, I.V. Prokopovich i dr.* // Zbirnik naukovih prac'. «Informacijni tehnologii v osviti, nauci ta virobnictvi». – Herson, 2013 – Vip 4(5). – S. 104-110. 7. Izmerenie parametrov kondensatorov [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://zpostbox.ru/izmerenie_parametrov_kondensatorov.html>. – 8.02.2017. 8. *Oborskij, G.A.* Vybormetrologicheskogo obespečenija upravlenija slozhnymi ob'ektami litejnogo proizvodstva s trudnoizmerimymi parametrami / *G.A. Oborskij, A.L. Stanovskij i dr.* // Vostochno-evropejskij zhurnal peredovykh tehnologij. Informacionnye tehnologii. – Har'kov, 2014. – № 6/3 (72). – S. 41-47. 9. *Bubnjak, T.I.* Vishha matematika. – L'viv: Novij svit, 2009. – 436 s. 10. *Usov, A.V.* Diferencijal'ne ta integral'ne chislenna funkciy bagat'oh zminnih / *A. V. Usov, V. M. Kuz'mina ta in.* – Odesa: Astroprint, 2007. – 245 s. 11. *Prokopovich, I.V.* Metrologichne zabezpečennja kontrolju shhll'nosti geterogennih materialiv / *I.V. Prokopovich, M.O. Duhanina ta in.* // Visnik NTU «HPB»: Serija: «Mehaniko-tehnologični sistemi ta kompleksi». – 2016. – № 50 (122). – S. 22-28.

УДК 621.923:[621.922]

Ю.Д. ФИЛАТОВ, д-р техн. наук,
В.И. СИДОРКО, д-р техн. наук,
С.В. КОВАЛЕВ, канд. техн. наук,
В.А. КОВАЛЕВ, канд. техн. наук,
О.Я. ЮРЧИШИН, канд. техн. наук, Киев, Украина

ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ ШЛАМА И ИЗНОСА ПОЛИРОВАЛЬНОГО ПОРОШКА В ЗОНЕ КОНТАКТА ИНСТРУМЕНТА И ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ДЕТАЛИ

В результаті дослідження закономірностей руху частинок шламу та зносу полірувального порошку всередині суспензії розраховано їхні траєкторії руху, які являють собою кільця, розташовані безпосередньо поблизу оброблюваної поверхні в зоні товщина якої 150 нм приблизно дорівнює половині розміру зерна полірувального порошку.

Ключові слова: шлам полірувального порошку

В результате исследования закономерностей движения частиц шлама и износа полировального порошка внутри суспензии рассчитаны их траектории движения, которые представляют собой кольца, расположенные в непосредственной близости к обрабатываемой поверхности в зоне толщиной 150 нм, приблизительно равной половине размера зерна полировального порошка.

Ключевые слова: шлам полировального порошка

As a result of studying the regularities of the movement of slime particles and the wear of the polishing powder, trajectories of the motion are calculated inside the slurry, which are rings located in close proximity to the surface to be treated in a zone of thickness 150 nm, approximately equal to half the grain size of the polishing powder.

Keywords: slime particles of the polishing powder

Введение

Изучение закономерностей движения частиц шлама и износа полировального порошка внутри полировальной суспензии при обработке деталей электронной техники и оптических систем, взаимодействия зерен полировального порошка с поверхностями обрабатываемой детали и притира осуществляется на основе кластерной модели сдвига материала при полировании [1] и физико-статистической модели образования и удаления с обрабатываемой поверхности частиц шлама [2], а также результатов исследования механизма диспергирования частиц шлама, их распределения по размерам [3, 4], динамики их столкновений и рассеяния в контактной зоне [5]. Вместе с тем, процессы взаимодействия частиц шлама (ЧШ) и частиц износа (ЧИ) полировального порошка в зоне контакта обрабатываемой поверхности с поверхностью притира внутри полировальной суспензии при полировании элементов электронной техники и оптических систем из

керамических материалов, оптических и полупроводниковых кристаллов изучены недостаточно, а причины возникновения налета частиц шлама и частиц износа зерен полировального порошка на поверхности притира не выяснены.

Целью исследования является изучение закономерностей движения частиц шлама и износа полировального порошка внутри полировальной суспензии при обработке оптоэлектронных элементов из керамики на основе нитрида алюминия.

Методика исследований

Элементы из керамики на основе нитрида алюминия полировали при помощи водной суспензии порошков нитрида бора КМ 0,5/0 на шлифовально-полировальном станке мод. 2ШП-200М при частоте вращения пенополиуретанового притира диаметром 100 мм – 90 об/мин, усилие прижима детали диаметром 60 мм к притиру – 50,5 Н, средней температуре в зоне контакта 300 К, времени полирования 30 мин. Нитрид алюминия (AlN, плотность – 3,26 г/см³, энергия связи – 6,2 эВ, коэффициент теплопроводности – 200 Вт/(м·К), статическая диэлектрическая проницаемость – 8,5, постоянные решетки $a = 0,3112$ нм, $c = 0,4982$ нм, частота собственных колебаний молекулярных фрагментов AlN – 248,6; 611,0; 657,4; 670,8; 890,0 и 912,0 см⁻¹ [6, 7]) обрабатывались суспензией порошков кубического нитрида бора (плотность – 2,18 г/см³, статическая диэлектрическая проницаемость – 2,5, частота собственных колебаний молекулярных фрагментов в cBN – 1055; 1125 и 1305 см⁻¹ [8]), в результате чего образовывались частицы шлама и износа полировального порошка, которые взаимодействовали между собой, а также с обрабатываемой поверхностью и поверхностью притира.

При полировании нитрида алюминия суспензией порошков КМ 0,5/0 образуются частицы шлама, размеры которых составляют дискретный набор: 1,7; 2,4; 2,9; 3,4 и 3,8 нм, их наиболее вероятный размер – 2,3 нм. Концентрация частиц шлама, которые образуются на площади контакта обрабатываемой поверхности и притира в единицу времени составляет $1,83 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Среднее значение объема частиц шлама – $2,4 \cdot \text{нм}^3$, количество молекулярных фрагментов AlN в частице шлама $\xi_1 = 57$. Среднее значение объема частиц износа полировального порошка – $2,8 \cdot \text{нм}^3$ (средний размер – 1,8 нм), количество молекулярных фрагментов BN в частице износа $\xi_2 = 74$. В процессе полирования в зоне контакта обрабатываемой детали и притира (объемом $1,39 \text{ мм}^3$) внутри полировальной суспензии образуются частицы шлама и износа полировального порошка общим объемом $9 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3$, то есть объем всех образовавшихся за это время частиц меньше объема контактной зоны в 500 раз. На одну частицу шлама (или частицу износа полировального

порошка) приходится объем 760 нм^3 , а среднее расстояние между ними составляет 9 нм .

Закономерности движения частиц шлама и износа в зоне контакта обрабатываемой поверхности и притира

Рассматривая взаимодействие частиц шлама внутри суспензии на основе закономерностей динамики молекулярных столкновений и классической теории рассеяния частиц [9-11] с учетом потенциала межмолекулярного взаимодействия, для двухчастичных столкновений угол θ_{ij} рассеяния можно выразить формулой [9, 10, 12]

$$\theta_{ij} = \pi - 2 \int_{R \min}^{l_0} \frac{b_{ij} dx}{x^2 \sqrt{1 - \left(\frac{b_{ij}}{x}\right)^2 - \frac{U_{ij}(x)}{E_i}}}, \quad (1)$$

где $b_{ij} = \frac{1}{2}(d_i + d_j)$ – прицельное расстояние, d_i – размеры i -х частиц шлама, x – расстояние между частицами, $U_{ij}(x)$ – потенциал межмолекулярного взаимодействия, $E_i = \frac{1}{2}\rho_1 v_i u^2$ – кинетическая энергия частицы, v_i – объем i -й частицы, $i = \overline{0, k-1}$ – номер частицы, $k = 5$ – число выборок в пуассоновском распределении частиц шлама по площадям поверхности, $u = 0,24 \text{ м/с}$ – скорость относительного перемещения детали и притира, $R \min = \frac{1}{2}(d_{i=0} + d_{j=0})$ – расстояние наибольшего сближения частиц.

С учетом распределения частиц шлама по размерам определен диапазон возможных значений угла рассеяния частиц шлама на частицах шлама: среднее $\bar{\Theta} = 153,8^\circ$, минимальное $\Theta_{\min} = 136,8^\circ$ и максимальное $\Theta_{\max} = 171,0^\circ$ значения. Показано, что более крупные частицы шлама рассеиваются на меньшие углы. С увеличением размера частиц шлама, на которых происходит рассеивание частиц, угол рассеяния также уменьшается. Кроме того, для произвольных размеров частиц шлама, участвующих в процессе рассеяния, частицы после соударений изменяют направление своего движения на угол не менее $3\pi/4$ рад., разлетаясь в противоположные стороны.

Эффективное дифференциальное сечение рассеяния частиц шлама $\sigma_{ij} = \pi(d_i + d_j)^2$ для всех рассматриваемых соударений частиц изменяется от $0,4$ до $1,8 \text{ Тб}$ ($1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2$). Величина эффективного дифференциального сечения рассеяния частиц шлама увеличивается при увеличении размеров частиц, участвующих в рассеянии. Количество частиц шлама, рассеянных в телесный угол $d\Omega = 2\pi \sin \vartheta d\vartheta$ за единицу времени, определяемое по

формуле [9, 11] $dn = n_i n_j \sigma_{ij} d\Omega$, позволяет представить зависимость плотности распределение частиц шлама $\frac{dn}{d\Omega}$ от угла рассеяния, показывающую, что частицы большего размера рассеиваются меньше.

Рассматривая взаимодействие частиц шлама с частицами износа полировального порошка внутри суспензии с учетом их межмолекулярного взаимодействия, среднего размера частиц износа полировального порошка ($d_2 = 1,8$ нм), прицельного расстояния $b_i = \frac{1}{2}(d_i + d_2)$ и расстояния наибольшего

сближения частиц шлама с частицами износа $R \min = \frac{1}{2}(d_{i=0} + d_2)$, можно по

формуле, аналогичной (1) рассчитать угол $\theta_2(i)$ рассеяния частиц шлама, а также выявить зависимость угла рассеяния частиц шлама на частицах износа полировального порошка от их размеров и определить его минимальное $\Theta \min = 143,8^\circ$ и максимальное $\Theta \max = 171,6^\circ$ значения. При увеличении размера i -х частиц шлама их угол рассеяния на частицах износа уменьшается, то есть более крупные частицы шлама рассеиваются на частицах износа полировального порошка на меньший угол. Эффективное дифференциальное сечение рассеяния частиц шлама на частицах износа полировального порошка $\sigma_i = \pi(d_i + d_2)^2$ изменяется в диапазоне от 0,4 до 1,0 Тб и увеличивается при увеличении размеров частиц шлама, участвующих в рассеянии. Плотность распределения частиц шлама имеет максимум ($0,7 \cdot 10^{14}$) при угле рассеяния $164,7^\circ$, который соответствует частицам шлама размером 2,4 нм, рассеиваемым на частицах износа на угол $164 - 165^\circ$. Число частиц шлама, рассеянных на частицах износа полировального порошка в интервале углов [143,8; 171,6], уменьшается при увеличении их размеров.

Рассматривая взаимодействие частиц износа полировального порошка между собой с учетом потенциал их межмолекулярного взаимодействия, прицельного расстояния и расстояния их наибольшего сближения, которые равны их среднему размеру $d_2 = 1,8$ нм, можно рассчитать угол их рассеивания $\theta_{22} = 173,2^\circ$. При этом их эффективное дифференциальное сечение рассеяния достигает значения 0,4 Тб, а плотность распределения

частиц шлама $\frac{dn}{d\Omega} = 1,3 \cdot 10^{14}$.

В результате анализа закономерностей рассеяния частиц шлама и износа полировального порошка установлено, что при рассеянии всех частиц, которые образуются в процессе полирования внутри суспензии (частиц шлама на частицах шлама, частиц шлама на частицах износа полировального порошка и частиц износа на частицах износа), угол рассеяния лежит в диапазоне [136,8° – 173,2°], эффективное дифференциальное сечение

рассеяния (Тб) – $[0,4 - 1,8]$, а плотность распределения частиц

$$\frac{dn}{d\Omega} = (0,3 - 1,3) \cdot 10^{14}.$$

Траектории движения частиц шлама и износа полировального порошка

Траектории движения частиц рассчитаны в системе координат, связанной с суспензией, заполняющей зону контакта обрабатываемой поверхности и притира, исходя из допущения, что частицы влетают в неподвижную среду, в которой они равномерно распределены, с постоянной скоростью. При помощи метода Монте-Карло рассчитывались углы, на которые отклонялась i -я частица шлама при рассеянии на j -ой частице шлама. При помощи генератора чисел в соответствии с распределением Пуассона случайным образом выбирался номер j_m и соответственно определялся угол рассеяния θ_{ij} . Величина угла, на который отклонилась i -я частица шлама после m столкновений, определялась формулой

$$\Delta_{im} = \begin{cases} 0, m = 0 \\ (m+1)\pi - \sum_{m=1}^m (\vartheta_{ij})_m, m \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

а ее координаты в системе XOZ (ось OX совпадает со средней линией профиля обрабатываемой поверхности):

$$X_{im} = \sum_{m=0}^m l \cos \Delta_{im}, \quad (3)$$

$$Z_{im} = z_i + \sum_{m=0}^m l \sin \Delta_{im}. \quad (4)$$

При рассеивании частиц износа полировального порошка на i -х частицах шлама, на который они отклонились после m столкновений, и их координаты определялись формулами:

$$\Delta_{2m} = \begin{cases} 0, m = 0 \\ (m+1)\pi - \sum_{m=1}^m [\vartheta_2(i)]_m, m \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$X_{2m} = \sum_{m=0}^m l \cos \Delta_{2m}, \quad (6)$$

$$Z_{2m} = z_i + \sum_{m=0}^m l \sin \Delta_{2m} . \quad (7)$$

При рассеивании частиц износа полировального порошка на частицах износа угол, на который они отклонились после m столкновений ($\theta_{22} = 173,2^\circ = \text{const}$), и их координаты определялись формулами:

$$\Delta_{22m} = \begin{cases} 0, m = 0 \\ (m+1)\pi - \sum_{m=1}^m \vartheta_{22}, m \geq 1 \end{cases} , \quad (8)$$

$$X_{22m} = \sum_{m=0}^m l \cos \Delta_{22m} , \quad (9)$$

$$Z_{22m} = z_i + \sum_{m=0}^m l \sin \Delta_{22m} . \quad (10)$$

В результате расчета координат частиц в соответствие с формулами (2) – (10) (для $z_i = z_0 + d_i / 2$, $z_0 = Ra$ – среднеарифметическое отклонение профиля обрабатываемой поверхности), после $m = 10$ и $m = 100$ столкновений установлено следующее. При рассеянии i -х частиц шлама на частицах шлама ($j = \overline{0,4}$) траектории их движения закручиваются (рис. 1, кривые 1 – 5) и частицы переходят на орбитальные траектории (рис. 2, кривые 1 – 5) [9], радиус которых тем больше, чем меньше размер рассеиваемых частиц (при уменьшении $i = \overline{0,4}$). Эти траектории представляют собой кольца, диаметр которых составляет 100 нм (для $i=0$), 60 нм (для $i=1$), 40 нм (для $i=2$), 30 нм (для $i=3$), 25 нм (для $i=4$), а ширина не превышает 10 нм. Все они расположены в непосредственной близости к обрабатываемой поверхности (в окрестности прямой $z = z_0$), на основании чего можно сделать вывод, что частицы шлама после отрыва от обрабатываемой поверхности «перекатываются» вблизи от нее, находясь внутри суспензии в выделенных кольцевых каналах, что согласуется с классическими представлениями о процессе полирования.

При рассеивании частиц износа полировального порошка друг на друге они двигаются внутри суспензии аналогично самым мелким частицам шлама ($i = 0$) (рис. 1, кривая 7), закручиваясь и переходя на орбитальные траектории (рис. 2, кривая 7) диаметром более 150 нм.

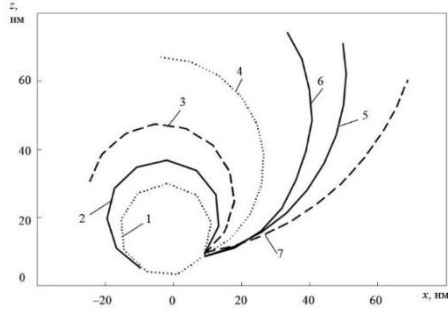


Рисунок 1 – Траектории движения частиц шлама и частиц износа полировального порошка после $m = 10$ столкновений:

- 1 – ЧШ ($i = 4$) + ЧШ; 2 – ЧШ + ($i = 3$) + ЧШ; 3 – ЧШ ($i = 2$) + ЧШ;
 4 – ЧШ ($i = 1$) + ЧШ; 5 – ЧШ ($i = 0$) + ЧШ; 6 – ЧИ + ЧШ ($i = \overline{0, 4}$); 7 – ЧИ + ЧИ

При рассеивании частиц износа полировального порошка на i -х частицах шлама траектория их движения характеризуется кривой 6 (рис. 1), которая закручивается приблизительно как траектории движения самых мелких частиц шлама (кривая 5, рис. 1) и частиц износа полировального порошка после рассеивания друг на друге (кривая 7, рис. 1). Эти частицы не переходят на орбитальные траектории (рис. 2, кривая 6), а совершают движение по линиям близким к окружностям, расположенным в зоне шириной 100 нм, примыкающей к обрабатываемой поверхности ($z = z_0$).

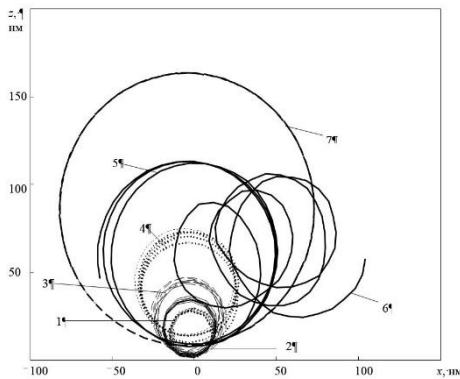


Рисунок 2 – Траектории движения частиц шлама и частиц износа полировального порошка после $m = 100$ столкновений:

- 1 – ЧШ ($i = 4$) + ЧШ; 2 – ЧШ + ($i = 3$) + ЧШ; 3 – ЧШ ($i = 2$) + ЧШ;
 4 – ЧШ ($i = 1$) + ЧШ; 5 – ЧШ ($i = 0$) + ЧШ; 6 – ЧИ + ЧШ ($i = \overline{0, 4}$); 7 – ЧИ + ЧИ

Выводы

Анализ закономерностей рассеяния частиц шлама и износа полировального порошка на основе классической теории рассеяния частиц показал, что рассеяние частиц происходит на углы $[136,8^\circ - 173,2^\circ]$, а эффективное дифференциальное сечение рассеяния составляет 0,4 – 1,8 Тб. Рассчитанные при помощи метода Монте-Карло траектории движения частиц шлама и износа полировального порошка представляют собой кольца или линии близкие к окружностям, расположенные в непосредственной близости к обрабатываемой поверхности в зоне толщиной приблизительно 150 нм. На основании этого можно сделать вывод, что частицы шлама и износа полировального порошка, которые образовались вблизи обрабатываемой поверхности, «перекатываются» вдоль нее, находясь внутри суспензии в зоне, толщина которой приблизительно равна среднему радиусу зерна полировального порошка.

Список использованных источников: 1. Филатов Ю.Д., Rogov B.V. Кластерная модель механизма усталостного износа SiO₂-содержащих материалов при их полировании инструментом со связанным полировальным порошком на основе диоксида церия // Сверхтвердые материалы. – 1994. – № 3. Ч. 1. – С. 40–43. 2. Филатов Ю.Д., Сидорко В.И. Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании // Сверхтв. материалы.– 2005.– № 1. – С. 58–66. 3. Филатов Ю.Д. Механизм образования микро рельефа поверхности при обработке стекла // Сверхтв. материалы. – 1991. – № 5. – С. 61–65. 4. Filatov Y.D., Filatov O.Yu., Sidorko V.I., Kovalev S.V. Polishing substrates of single crystal silicon carbide and sapphire for optoelectronics / *Funct. mater.* – 2016. – V. 23. – No. 1. – P. 104–110. 5. Sidorko V., Novikov M., Filatov Yu. Diamond-abrasive finishing non-metallic materials // Conference Proceedings of International Conference «Advanced Processing for Novel Functional Materials – APNFM 2008». – 23–25 January 2008. – pp. 141–143. 6. Properties of the III-nitride semiconductors. – доступ: <http://www.semiconductors.co.uk/nitrides.htm>. 7. Davydov V.Yu., Kitaev Yu.E., Goncharuk I.N., et al., Phonon dispersion and Raman scattering in hexagonal GaN and AlN // *Phys. Rev. B*, 1998. – Vol. 58. – No. 19. – P. 12899–12907. 8. Zhua Y., Dinga W., Xua J., Yan C., An investigation of residual stresses in brazed cubic boron nitride abrasive grains by finite element modelling and Raman spectroscopy // *Materials and Design*, 2015. – Vol. 87. – P. 342–351. 9. Эйринг Г., Лин С.Г., Лин С.М. Основы химической кинетики: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 528 с. 10. Динамика столкновений и рассеяния частиц шлама в зоне контакта инструмента и детали при полировании стекла / Филатов Ю.Д., Сидорко В.И., Ковалев С.В., Филатов А.Ю. // Весник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Машиностроєння.– К.: НТУУ «КПІ». – 2008. – N 52. – С. 201–207. 11. Филатов Ю.Д. Взаимодействие частиц шлама и износа в зоне контакта инструмента и детали при полировании неметаллических материалов / Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ «ХПІ». – Харків. – 2009.– Вип. 2 (19).– С. 201–206. 12. Юхновський І.Р. Основи квантової механіки: Навч. Посібник. – 2-ге вид., перероб. і доп. – Львів, 2002. – 392 с.

Bibliography (transliterated): 1. Filatov Ju.D., Rogov V.V. Klasterijna model' mehanizma ustalostnogo iznosa SiO₂-soderzhashhij materialov pri ih polirovanij instrumentom so svjazannym poliroval'nym poroshkom na osnovе dioksida cerija // Sverhtverdye materialy. – 1994. – № 3. Ch. 1. – S. 40–43. 2. Filatov Ju.D., Sidorko V.I. Statisticheskij podhod k iznosu poverhnostej detalej iz nemetallicheskih materialov pri polirovanij // Sverhtv. materialy.– 2005.– № 1. – S. 58–66. 3. Filatov Ju.D. Mehanizm obrazovanija mikrorel'efa poverhnosti pri obrabotke stekla // Sverhtv. materialy. – 1991. – № 5. – S. 61–65. 4. Filatov Y.D., Filatov O.Yu., Sidorko V.I., Kovalev S.V.

Polishing substrates of single crystal silicon carbide and sapphire for optoelectronics / *Funct. mater.* – 2016. – V. 23. – No. 1. – P. 104–110. **5.** *Sidorko V., Novikov M., Filatov Yu.* Diamond-abrasive finishing non-metallic materials // Conference Proceedings of International Conference «Advanced Processing for Novel Functional Materials – APNFM 2008». – 23–25 January 2008. – pp. 141–143. **6.** Properties of the III-nitride semiconductors. – [dostup: http://www.semiconductors.co.uk/nitrides.htm](http://www.semiconductors.co.uk/nitrides.htm). **7.** *Davydov V.Yu., Kitaev Yu.E., Goncharuk I.N., et al.*, Phonon dispersion and Raman scattering in hexagonal GaN and AlN // *Phys. Rev. V*, 1998. – Vol. 58. – No. 19. – P. 12899–12907. **8.** *Zhua Y., Dinga W., Xua J., Yan C.*, An investigation of residual stresses in brazed cubic boron nitride abrasive grains by finite element modelling and Raman spectroscopy // *Materials and Design*, 2015. – Vol. 87. – P. 342–351. **9.** *Jeiring G., Lin S.G., Lin S.M.* Osnovy himicheskoy kinetiki: Per. s angl. – M.: Mir, 1983. – 528 s. **10.** Dinamika stolknovenij i rassejaniya chastic shlama v zone kontakta instrumenta i detali pri polirovanii stekla / *Filatov Ju.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Filatov A.Ju.* // *Vesnik nacional'nogo tehničeskogo universiteta Ukrainy «Kievskij politehničeskij institut»*. Mashinostroenie.– K.:NTUU «KPI».– 2008. – N 52.- S. 201-207. **11.** *Filatov Ju.D.* Vzaimodejstvie chastic shlama i iznosa v zone kontakta instrumenta i detali pri polirovanii nemetallicheskih materialov / *Visoki tehnologii v mashinobuduvanni: Zbirnik naukovih prac' NTU «HPI»*. – Harkiv. – 2009.– Vip. 2 (19).– S. 201–206. **12.** *Juhnovskij I.R.* Osnovi kvantovoi mehaniki: Navch. Posibnik. – 2-ge vid., pererob. i dop. – *Libid'*, 2002. – 392 s.

ЕКОНОМІКА ТА ОСВІТА

УДК 621.71; 621.757

Г.П. КРЕМНЕВ, канд. техн. наук,
А.А. ОРГИЯН, д-р техн. наук,
В.В. СТРЕЛЬБИЦКИЙ, канд. техн. наук, Одесса, Україна

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НОВЫХ УЧЕБНЫХ КУРСОВ ПОДГОТОВКИ БАКАЛАВРОВ ПО ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКЕ

В статті розглядаються особливості викладання курсу "Технологія складання машин" кафедрою технології машинобудування ОНПУ.

Представлені особливості роботи технологів з урахуванням специфіки сучасних виробництв. Запропоновано структуру курсу лекцій і практичних занять при підготовці бакалаврів, зазначено особливості викладання окремих тем.

Ключові слова: підготовка бакалаврів, структура курсу лекцій

В статье рассматриваются особенности преподавания курса «Технология сборки машин» кафедрой технологии машиностроения ОНПУ.

Представлены особенности работы технологів с учетом специфики современных производств. Предложена структура курса лекций и практических занятий при подготовке бакалавров, излагаются особенности преподавания отдельных тем.

Ключевые слова: подготовка бакалавров, структура курса лекций

In the article features of teaching the course "Technology of assembling machines" by a department by Technology of engineer of ONPU.

The specifics of the work of technologists are presented taking into account the specifics of modern productions. The structure of the course of lectures and practical studies for the preparation of bachelors is offered, the peculiarities of teaching certain topics are expounded.

Keywords: preparation of bachelors, the structure of the course of lectures

В соответствии со стандартом МОН Украины [1] в описании предметной области бакалавра по прикладной механике специальности 131 в целях обучения указана «разработка технологий машиностроительных производств», в теоретическом содержании предметной области имеется «теория проектирования технологий производства машин», в методах, методиках и технологиях обучения – «методики проектирования, контроля, исследований и разработки технологий изготовления и сборки элементов машин и конструкций, технологий автоматизированных машиностроительных производств», а в инструментарии – «станки, инструменты, технологические и контрольные приспособления, системы ЧПУ» и др.

Ранее подготовка бакалавров по прикладной механике со специализацией по технологии машиностроения в общем-то имела примерно такой же набор требований, но упор ВУЗов делается на то, что этот

специалист будет производителем новых изделий – машин или их частей.

С 2016 года в ОНПУ открыта подготовка бакалавров по новой специализации «компьютерное проектирование инновационных технологий». Что же изменилось в новых реалиях? Прикладная механика была и осталась той же специальностью, но специализация по инновационным технологиям стала более широкой по своему охвату потенциального рынка труда бакалавров: кроме производящих машины и изделия предприятий добавляются сервисные центры, ремонтные предприятия, различные мастерские, в которых специалист на первом этапе своей работы связан с диагностикой, испытаниями каких-либо изделий, ремонтом их или модернизацией, а они суть того, что делается в сборочном процессе, только меняются места: сборка – заключительный этап изготовления какого-либо нового изделия, а при ремонте – разборка – начало, затем набор определенных действий и сборка изделия в его «новом» виде. Т.о. бакалавра заранее следует готовить и к тому, что он будет не только изготовителем новых изделий, а скорее – не изготовителем их, да и ещё не в таких хорошо проработанных заранее условиях производства (наличие полного комплекта документации, хорошо оснащенное производство, высокий уровень механизации и автоматизации производства и др.). Наш специалист, возможно, будет работать в многономенклатурном производстве, слабо обеспечен технической документацией, располагать универсальными техническими средствами и обладать, если заложено, очень широкой эрудицией в возможных его действиях. Трудоустройство бакалавров предполагается на предприятиях и ПКО машиностроения и в других организациях на разных должностях, предназначенных для эксплуатации, обслуживания и ремонта оборудования. Это сложно: научить бакалавра, чтобы он разработал технологический процесс и его обеспечение, например, процесс по которому можно собирать какую-то часть а/м на автоматизированном конвейере автозавода за 20 с. (разработать технологию, программы работы роботов и РТК, провести расчеты и др.). А разве это проще: Вы приехали на СТО на а/м, в котором что-то не так (хуже, если Вас с а/м привезли) и диагностика подсказала место и потенциальную причину неполадки и её следует устранить, нет, не за 20 с. цикла работы конвейера, а за значительно более протяженный отрезок времени. Вот здесь и начинается компетенция человека – специалиста СТО, в том числе и в области сборочных процессов. Следовательно, только на этом примере подготовка бакалавров по прикладной механике со специализацией по компьютерному проектированию инновационных технологий должна строиться и на том, что будущий специалист будет иметь глубокие знания и компетенции в области технологии сборки элементов машин и их конструкций. Ранее вопросы сборки машин затрагивались в курсах технологии машиностроения, и по объему часов и требованиям к специалисту этот раздел технологии не был главным.

Вышеуказанные рассуждения привели в ОНПУ к тому, что в РУП бакалавра был введен курс «Технология сборки машин».

Следует отметить явную непоследовательность разработчиков стандарта [1]: в технологиях обучения четко указано о и «сборке элементов машин и конструкций», а в результатах – компетенциях и навыках этого нет, следовательно, может и не обеспечиваться в результатах обучения. Точнее, этот тезис отдан на откуп ВУЗам, их интересам, моде, обеспеченности учебного процесса и другому.

Эта же непоследовательность стандарта проявляется и в направлении формообразования поверхностей и деталей машин: технологии быть должны, этому необходимо учить, а проверять результат как бы и нет необходимости. Но о курсах по формообразованию авторы планируют провести отдельный разговор.

Итак, появление курса по технологии сборки машин диктует необходимость его методического обеспечения (4 кредита, 30 часов лекций и 30 часов практических занятий). Анализ учебной литературы по этому направлению показал её явную сверхлаконичность (это же всего раздел курса общей технологии машиностроения) и очень солидный возраст, а по проведению практического цикла – её отсутствие.

Авторы сделали попытку подготовить учебное пособие лекционному курсу "Технология сборки машин" и практическим занятиям, так учебное пособие по курсу лекций, его состав приведен ниже, он предполагает 15 тем по сборке.

Введение

1. Основные процессы сборочного производства.
2. Методы обеспечения неразъемных неразборных сборочных единиц.
3. Методы обеспечения разъемных разборных сборочных единиц.
4. Типовые процессы сборки.
5. Проектирование технологического процесса сборки.
 - 5.1. Общие сведения.
 - 5.2. Анализ на технологичность сборочной единицы.
 - 5.3. Разработка схемы сборки.
 - 5.4. Размерный анализ сборки.
 - 5.5. Разработка маршрутного техпроцесса сборки.
 - 5.6. Разработка технологической операции сборки.
 - 5.7. Технологические расчеты при сборке.
 - 5.8. Технологическая документация сборки.
6. Механизация операций сборки.
7. Автоматизация процессов сборки.
8. Сборочные процессы в автоматизированном производстве.

Литература.

Учебное пособие по практическим занятиям "Технология сборки машин" также сформировано из расчета на 15 занятий и его структура приведена ниже.

Введение

1. Общие вопросы сборки.

1.1. Исходные данные для разработки технологического процесса сборки.

1.2. Служебное назначение сборочной единицы.

1.3. Размерный анализ чертежа сборочной единицы (методы достижения точности замыкающего звена при сборке).

1.4. Анализ технологичности конструкции сборочной единицы.

1.5. Сборка неподвижных неразъемных соединений (соединения с натягом).

2. Технологические процессы общей сборки.

2.1. Разработка технологической схемы сборки.

2.2. Разработка технологического процесса сборки.

2.3. Нормирование технологического процесса сборки.

2.4. Проектирование ТП сборки шестеренного насоса.

3. Методы сборки.

3.1. Метод сборки с полной взаимозаменяемостью звеньев.

3.2. Метод сборки с неполной взаимозаменяемостью, звеньев сборочной единицы.

3.3. Сборка сборочной единицы с применением метода пригонки.

3.4. Сборка сборочной единицы с использованием регулируемых компенсаторов.

3.5. Метод автоматической сборки.

Литература.

Мы полагаем, что темы 1.2; 1.3; 2.2; 2.3 и 2.4 могут быть выполнены студентами в ходе не 2-х часового цикла, а за 4 часа, и это решение принимает преподаватель, анализируя степень подготовленности студентов и усвоения ими материала занятия.

Рукописи указанных выше пособий сейчас проходят окончательный этап подготовки к изданию и в скором времени могут быть сданы в издательство.

Авторы готовы к сотрудничеству и конструктивному диалогу. Замечания и предложения могут быть направлены по адресу: 65044, г. Одесса, пр-т Шевченко, 1, кафедра Технология машиностроения им. А.А.Маталина, проф. Кремневу Г.П., тел. 0487058383, 0674804285, kremnev.g.p@opu.ua.

Список использованных источников: 1. Стандарт вищої освіти України. Проект. Спеціальність 131 «Прикладна механіка», ступінь вищої освіти – бакалавр. Київ, МОН України, 2016. – 10 с.

Bibliography (transliterated): 1. Standart vishhoї osviti Ukraїni. Proekt. Special'nist' 131 «Prikladna mehanika», stupin' vishhoї osviti – bakalavr. Kiїv, MON Ukraїni, 2016. – 10 s.

УДК 338.34.1

Р. Ф. СМОЛОВИК, канд. экон. наук, Харьков, Украина

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОНЯТИЯ ИННОВАЦИОННОСТИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ ПОСТИНДУСТРИАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

У статті аналізуються особливості постіндустріального виробництва, особливості сучасного розвитку соціально-економічних систем, обґрунтовується необхідність пошуку більш досконалих підходів до процесу керування розвитком, аналізується необхідність вивчення особливості інноваційності як елемента понятійного апарата системи інноваційного розвитку з погляду матеріалістичної діалектики сучасної хвильової теорії розвитку й значення в цьому процесі новоутворення.

Ключові слова: постіндустріальне виробництво, інноваційний розвиток

В статье анализируются особенности постиндустриального производства, особенности современного развития социально-экономических систем, обосновывается необходимость поиска более совершенных подходов к процессу управления развитием, анализируется необходимость изучения особенности инновационности как элемента понятийного аппарата системы инновационного развития с точки зрения материалистической диалектики современной волновой теории развития и значение в этом процессе новообразования

Ключевые слова: постиндустриальное производство, инновационное развитие

The article analyzes the peculiarities of post-industrial production, the features of modern development of socio-economic systems, the necessity for a claim of more sophisticated approaches to the process of development management, analyzes the necessity of studying the characteristics of innovation as an element of the conceptual apparatus of the system of innovative development from the point of view of the materialist dialectic of modern wave theory of development and the importance in this process neoplasm.

Keywords: post-industrial production, innovative development

Вступление. Любое промышленное предприятие, как открытая система внешнего и внутреннего окружения, в условиях индустриального производства представляет собой лишь замкнутый цикл переработки исходных ресурсов в готовый продукт.

Постиндустриальное (инновационное) производство в отличие от указанного выше, включает в свою сферу целый комплекс других видов производств от заготовительных до депроизводственных. Следовательно, представляет сложную систему, предъявляющую особые требования к качеству исходных ресурсов, сервисному обслуживанию и становится наиболее восприимчивым к техническим и организационным нововведениям, важнейшая роль в которых отводится инновационным процессам, поскольку они обладают циклическими свойствами. Необходимо отметить, что некоторые ученые, специалисты в данной области уделяют значительное внимание

инновационным процессам, однако не дают четкого определения их особенности, а лишь опосредовано их характеризует. Такие украинские ученые как Гренив Б. В., Гусев В. А., Перерва П. Г., Данько М. и другие рассматривают вопросы инновационной деятельности. Однако мало внимания уделяют экономической сущности самого понятия инновационности процессов.

Цель исследования. В связи с этим, учитывая все сказанное выше, исходя из особенности современного этапа инновационного развития, в целях дальнейшего исследования возникает, на наш взгляд, необходимость разработки некоторых аспектов, элементов действующего понятийного аппарата системы инновационного развития; анализа возможности формализованного количественного (качественного) выражения ее целевых, конечных результатов.

Задача данного исследования состоит в обосновании концептуального определения, качественной характеристики сущности одного из элементов понятийного аппарата процесса инновационного развития – **инновационности** – во всем многообразии ее проявления, применения, с целью характеристики состояния достигнутого уровня инновационного развития как любой системы в целом, так и ее элементов на основе количественных показателей.

Объект исследования – система инновационного развития. Предмет исследования – методы оценки инновационности, как одного из элементов понятийного аппарата системы инновационного развития.

Основная часть. Современная социально-экономическая система имеет две тенденции существования: функционирование и развитие. Последнее представляет собой процесс приобретения нового качества, укрепляющего жизнеспособность предприятия в условиях изменения окружающей среды. Ориентация промышленных предприятий Украины на систему мирового рынка и его конкуренцию требует разработки стратегии управления процессом инновационного развития.

Следовательно, в современных условиях выхода из кризисных ситуаций для многих промышленных предприятий требуется решения задач, способствующих совершенствованию процесса управления развитием предприятия. В связи с этим возникает необходимость совершенствования как теоретических, так и практических вопросов управления инновационным развитием предприятий с учетом особенностей современного состояния экономики Украины. Поиск более совершенных подходов к процессу управления инновационным развитием в этих условиях требует решения некоторых как теоретических, так и практических задач, поскольку должен базироваться на анализе системы показателей позволяющих: с одной стороны – оценить текущее состояние хозяйственной деятельности предприятия; а с

другой – разработать действенный механизм дальнейшего развития предприятия и условия его мониторинга.

Практическое решение указанных выше задач требует уточнения основной сущности содержания некоторых элементов понятийного аппарата системы инновационного развития, специфики их формирования в современных условиях рыночных отношений.

В своем исследовании мы исходим из анализа некоторых особенностей процесса инновационного развития. В современных условиях глобализации социально-экономических систем процесс их инновационного развития, как искусственно творимый процесс, рассматривается как сложная система, направленная на становление их будущего, структура которой представляет собой совокупность разнообразных видов деятельности: науки, разработки научного замысла; мониторинга, программирования, прогнозирования.

В процессе исследования учитывается и тот факт, что главной основополагающей ценностью любой социально-экономической формации становятся постоянные качественные изменения как условий, так и форм жизнедеятельности всего человечества. Причем, указанный процесс изменений – постоянный, непрерывный, многообразный, результатом которого является новообразование более высокого уровня инновационности, выраженное как количественно, так и качественно.

Проведенные нами исследования позволили сделать вывод, что в специальной литературе не уделяется должного внимания самой сущности, содержанию понятия инновационности, как экономической категории, специфическим условиям ее формирования, ее значению в системе инновационного развития; возможности формализованного выражения ее результативности. Так, например, инновационность трактуется как:

– самый распространенный вариант стратегии бизнеса, обладающий истинной креативностью;

– способность влиять на самую суть предложений самой компании по совершенствованию не только товара, но и системы товародвижения, увеличивающие привлекательности, ценности товара для потребителя, влияющие на увеличение спроса, обеспечивающие успех в условиях рынка.

В процессе исследования необходимо исходить из некоторых основных теоретических положений:

– с точки зрения материалистической диалектики инновационность, как комплексный результирующий показатель уровня развития, выступает в форме интеллектуального мышления, позволяющая познавать общие, существенные признаки вещей, явлений объективной действительности, имеющие большое экономическое, социальное значение для практической деятельности общества [6];

– современная волновая теория развития базируется на гипотезе о том, что всякое развития начинается с новообразования [1], которое обладает

способностью оказывать разного уровня свое усилие, влияние на окружающую среду;

– под воздействием указанных изменений проявляются новые признаки окружающей среды, которые, также будут различаться по своим качественным и количественным параметрам относительно их базовых значений, т.е. ранее существовавших;

– полученные новые, хотя и разнородные показатели, будут характеризовать более высокий уровень инновационности процессов; однако этот уровень, в то же самое время будет представлять собой результат воздействия новообразования с одной стороны, а с другой – достижение поставленной цели развития.

Проведенное исследование позволяет сделать вывод: инновационность как экономическая категория выступает в виде результирующего (интегрального) показателя и представляет собой результат взаимодействия многообразных факторов синегрии процесса развития.

Однако в процессе определения сущности понятия инновационности необходимо учитывать некоторые специфические условия, обеспечивающие непрерывность инновационного процесса развития.

Во-первых, инновационная деятельность может функционировать только в условиях самоорганизации постоянного, непрерывного процесса интеллектуальной деятельности при условии обязательной практической реализации ее факторов. Если необходимое условие непрерывности процесса не соблюдается, инновационная система разрушается.

Во-вторых, наукоемкое производство, как известно, характеризуется значительной степенью неопределенности и риска. Риск инновационной продукции – риск финансовый; поэтому в зарубежной практике основным направлением организации производства инновационных идей, процессов является венчурный бизнес, основанный на венчурном финансировании, которое осуществляется специальными частными и государственными фондами, инвестиционными компаниями.

В-третьих, инновационности как экономической категории присущи, в равной степени, признаки рациональности и иррациональности. С одной стороны она – противоположность консерватизму, направленному на сохранение существующего состояния системы, а с другой – в пределах стратегии изменений, направлена на «имитацию», на моделирование существующего положения системы.

В-четвертых, инновационность, как понятие экономическое, должна учитывать изменения затрат общественного труда, как живого, так и прошлого, обеспечивающего постоянный рост производительности труда, эффективность общественного производства; экономное использование всех видов ресурсов.

В-пятых, необходимо также учитывать, что творческий процесс является основным двигателем инновационности. В условиях рыночной экономики он, в первую очередь, – главный ресурс предпринимательской деятельности. Следовательно, признак инновационности всегда взаимосвязан с конкуренцией и рыночной экономикой.

В-шестых, необходимо учитывать и те противоречивые процессы, которые протекают в социально-экономических системах под воздействием глобализации; противоречия, взаимосвязанные с проблемой неравномерности распределения всех видов ресурсов среди стран мира и противоречия, вызванные несоответствующим уровнем развития социальных инфраструктур, призванных обеспечивать их способность к восприятию инновационных процессов. Особенность влияния глобализации заключается в том, что основную долю богатства страна создает не за счет материального производства, а за счет производства новых знаний и их реализации в сфере производства, услуг. При этом широко используется система кооперирования с другими странами для которой необходимы мировые производственные, финансовые, транспортные, информационные сети, которые решают задачи перемещения знаний, ресурсов, продуктов [1].

Следовательно, каждый из противоречивых разнонаправленных факторов воздействия окружающей среды оказывает разное по своей силе воздействия влияния на формирование конечных результатов инновационного развития, которые, во многих случаях, достаточно сложно выразить количественно.

Выводы. Проведенный анализ некоторых особенностей формирования нового, более высокого уровня инновационности требует дальнейшего, глубокого исследования применительно к конкретным производственным условиям. Кроме того требуется исследование влияния на инновационность как экономическую категорию потенциала новой идеи, т.е. будет ли она радикальной, комбинаторной, модифицирующей [4].

Однако даже на этапе проведенного исследования можно сформулировать понятие инновационности, в первую очередь, как экономическую категорию, представляющую собой конечный результат целеполагания системы инновационного развития, который может быть формализован, т.е. определен на основе расчетных, количественных, качественных показателей. Причем указанные показатели могут быть как общими (учитывающими изменения затрат общественного труда), так и частными (учитывающими снижение затрат части труда – живого или прошлого); ценностными (денежными), натуральными, абсолютным, относительными.

Тогда можно исходить из того предположения, что полученный в этом случае результат целеполагания инновационного развития, формализованный в виде совокупности количественных, качественных величин достигнутых

изменений в системе относительно ее базового состояния, может характеризовать, на наш взгляд, новый относительный уровень инновационности товаров, технологий.

Список использованных источников: 1. *Гринеv Б. В.* Инноватика / Б. В. Гринеv, В. А. Гусев. – Х., 2004. – 440 с. 2. *Borman Diter. Menedzment / Borman Diter.* – Hamburg: Sund W, 1992. – 963 p. 3. Путьятин Ю. А. Финансовые механизмы стратегического управления развитием предприятия / Ю. А. Путьятин, А. И. Пушкарь, А. Н. Тридед. – Х.: Основа, 1999. – 486 с. 4. *Бандурка А. М.* Технологическая инновационная деятельность. Менеджерский аспект / А. М. Бандурка, А. А. Епифанов, Л. Н. Ивин и др. – Х., 2004. – 304 с. 5. Основы предпринимательского дела / Под ред. И. М. Осипова. – М., 1997. – 410 с. 6. Краткий философский словарь / Под ред. М. Розенталя. – М. : Государственное издательство политической литературы, 1964. – 502 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Grinev B. V. Innovatika / B. V. Grinev, V. A. Gusev.* – H., 2004. – 440 s. 2. *Borman Diter. Menedzment / Borman Diter.* – Hamburg: Sund W, 1992. – 963 p. 3. *Putjatin Ju. A. Finansovye mehanizmy strategicheskogo upravlenija razvitiem predprijatija / Ju. A. Putjatin, A. I. Pushkar', A. N. Trided.* – H.: Osnova, 1999. – 486 s. 4. *Bandurka A. M. Tehnologicheskaja innovacionnaja dejatel'nost'. Menedzherskij aspekt / A. M. Bandurka, A. A. Epifanov, L. N. Ivin i dr.* – H., 2004. – 304 s. 5. *Osnovy predprinimatel'skogo dela / Pod red. I. M. Osipova.* – M., 1997. – 410 s. 6. *Kratkij filosofskij slovar' / Pod red. M. Rozentalja.* – M. : Gosudarstvennoe izdatel'stvo politicheskoi literatury, 1964. – 502 s.

ЗМІСТ

Сокол Е.И, Добротворский С.С, Пермьяков А.А., Гнучих С.С.
JAVAMACH CLUSTER – единая платформа обазования, науки
и производства.....3

ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

Дядя С.И. Исследование формирования обработанной поверхности
тонкостенного элемента детали при концевом цилиндрическом
фрезеровании с автоколебаниями.....5

Кальченко В.І., Кальченко В.В., Кужельний Я.В., Кальченко Д.В.
Визначення сумарної сили різання одиничним абразивним зерном при
шліфуванні зі схрещеними осями круга та деталі.....20

Тонконогий В.М., Сіньковський А.С., Рибак О.В. Врахування
властивостей композиційних порошків на основі TiC, плакованого Ni(P),
при розробці САПР ТП.....31

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

Гуцаленко Ю.Г. Применения и перспективы прорезных пружин в
машиностроении41

Клименко С.А., Копейкина М.Ю., Чумак А.О. Технологические
возможности инструментов, оснащенных композитами на основе
кубического нитрида бора.....54

Kunitsyn M.V., Usov A.V. Tribocorrosion research of NI-Al₂O₃/TiO₂
composite materials obtained by the method of electrochemical deposition.....61

Рябченко С.В. Перспективные процессы шлифования зубчатых колес
алмазно-абразивными инструментами.....70

Турманидзе Р.С., Бачанадзе В.И., Попхадзе Г.З. Основные
технологические процессы необходимые для изготовления мехатронных
систем удовлетворяющие современные требования и проблемы их
инструментального обеспечения на фоне призывов “ИНДУСТРИЯ 4.0”78

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ

- Васильев А.И., Коваль В.А.* Особенности прогнозирования стоимости жизненного цикла газотурбинных двигателей и установок.....91
- Деревянченко А.Г., Кожухарь Т.В., Волков С.К.* Комплексная система для распознавания классов дефектов поверхностей и структур материалов98
- Клименко Г.П., Квашин В.В.* Прогнозування надійності інструментів збірної конструкції109
- Мироненко Є.В., Калініченко В.В., Гузенко Д.Є.* Аналіз можливостей використання різців з твердосплавними різальними пластинами зі зносостійкими покриттями при напівчистовій обробці валків прокатних станів116
- Тонконогий В.М., І.В. Прокопович, М.О. Духаніна В.В. Добровольська* Методи вимірювання ефективних значень параметрів переносу в машинобудівних деталях із гетерогенних матеріалів126
- Филатов Ю.Д., Сидорко В.И., Ковалев С.В., Ковалев В.А., Юрчишин О.Я.* Движение частиц шлама и износа полировального порошка в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали.....135

ЕКОНОМІКА ТА ОСВІТА

- Кремнев Г.П., Оргиян А.А., Стрельбицкий В.В.* Методическое обеспечение новых учебных курсов подготовки бакалавров по прикладной механике.....144
- Смоловик Р.Ф.* Методологические аспекты понятия инновационности в современных условиях развития постиндустриального производства148

Науково-виробниче видання

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ

Збірник наукових праць
Українською, російською та англійською мовами

Випуск 12

Відповідальний за випуск: проф. *В. О. Федорович*

Матеріали відтворено з авторських оригіналів

Підп до друку 31.08.2017 р. Формат 60 × 84 1/16. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 9,1. Наклад 300 пр., 1-й з-д 1–20.
Зам. № 147. Ціна договірна.

Виготовлювач Видавничий цент НТУ «ХП»,
вул. Фрунзе, 21, м. Харків-2, 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.