

Министерство промышленности Республики Беларусь  
Национальная академия наук Беларуси  
Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь  
Белорусский национальный технический университет  
Государственное научно-производственное объединение «ЦЕНТР»  
ЗАО «МИНСКЭКСПО»

**«ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ  
МАШИНОСТРОЕНИЯ И МЕТАЛЛООБРАБОТКИ»**

**«ТЕХНОЛОГИЯ – ОБОРУДОВАНИЕ –  
ИНСТРУМЕНТ – КАЧЕСТВО»**

Тезисы докладов 36-ой Международной научно-технической конференции  
в рамках международной специализированной выставки  
«Машиностроение/Металлообработка–2022»

(Минск, 7 апреля 2022 г.)

Минск  
БНТУ  
2022

УДК 621 (082)  
ББК 34.4.я43  
П27

**Редакционная коллегия:**  
**В.К. Шелег** (ответственный редактор),  
**Л.А. Колесников** (ответственный секретарь),

О.К. Яцкевич, О.Г. Девойно, М.А. Белоцерковский, В.А. Данилов,  
В.В. Булавицкий, В.И. Бородавко, А.И. Сафонов, М.Л. Хейфец,  
А.М. Якимович, М.М. Кане, Ю.В. Синькевич

П27 «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» «Технология – Оборудование – Инструмент – Качество» : тезисы докл. междуна. науч.-техн. конф. (Минск, 7 апреля 2022 г.) / редкол.: В.К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2022. – 115 с.

**Рецензенты:**

академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор **Клубович В.В.**  
академик НАН Беларуси, д.т.н., **Ласковнёв А.П.**

Тезисы докладов, представленные на 36-ой Международной научно-технической конференции «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» «Технология–Оборудование–Инструмент–Качество», посвящены новым процессам механической обработки материалов, созданию специального инструмента и технологической оснастки и их влиянию на качество обрабатываемых поверхностей.

Тезисы докладов предназначены для специалистов промышленных предприятий, научных сотрудников, аспирантов, магистрантов и преподавателей высших учебных заведений.

Тезисы докладов приняты к опубликованию в оригинале без правок.

**УДК 621 (082)**  
**ББК 34.4.я43**

**ISBN 978-985-6939-26-9**

© Национальная академия наук Беларуси, 2022  
© БНТУ, 2022  
© ГНПО «Центр»  
© МИНСКЭКСПО, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

Акулович Л.М., Сергеев Л.Е., Званский Н.Д. Магнитно-абразивная обработка штоков гидроцилиндров	6
Белоцерковский М.А., Грищенко А.О. Исследование возможности использования газопламенного напыления композиционных покрытий при изготовлении абразивного инструмента	8
<u>Белявин К.Е.</u> , Щукин В.Я., Кожевникова Г.В. Производство скальных резцов повышенной стойкости методом поперечно-клиновой прокатки	10
Беляков Н.В., Попок Н.Н., Яснев Д.А., Эбако М.Э. Методическое, алгоритмическое и программное обеспечение базирования моделей деталей машин в рабочей зоне 3D-принтеров	12
Босяков А.В., Ванюк Э.А., Сокоров И.О. Исследование микротвердости функциональных покрытий, модифицированных наноуглеродными компонентами (частицами фуллереновой сажи)	14
Данилов А.А. Анализ схем течения поверхностей с регулярным профилем	16
Данилов А.А. Сравнение профилей моментопередающих соединений деталей машин	18
Данилов В.А. Обеспечение надежного стружкодробления совмещением процессов частичного и полного формообразования обработанной поверхности	20
Данилов В.А. Обоснование направления движения формообразования при синтезе схемы обработки криволинейной поверхности	22
Данилов В.А., Наранович В.Ф. Развитие методов формообразования пазов на торцах кольцевых деталей	24
Девойно О.Г., Шелег В.К., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Пилецкая Л.И. Геометрические параметры валиков при лазерной наплавке с поперечным сканированием	26
Довнар С.С., Колесников Л.А., Яцкевич О.К., Авсиевич А.М., Шашко А.Е. Повышение статической жесткости несущей системы 5-осевого станка с ЧПУ	28
Довнар С.С., Лапука А.Д. МКЭ-анализ бионического усиления колонн станков	31
Дубенец С.С. Методы определения плотности дислокаций металлов и сплавов поковок, полученных поперечно-клиновой прокаткой	35
Дудяк А.И., Дикан Ж.Г., Мелеховец П.А., Сахнович А.Д. Методика расчета стержней из композиционных материалов	38
Дудяк А.И., Хвасько В.М., Дикан Ж.Г. Определение касательных напряжений при кручении стержня из двух разнородных материалов	39
Зверко А.А., Дьячкова Л.Н., Шелег В.К. Влияние предварительной механической обработки на износостойкость изделий из антифрикционных композиционных порошковых инфильтрированных материалов на основе железа	41

Иванов И.А. Анализ кинетических и термодинамических параметров процесса осаждения ионно-плазменных покрытий в вакууме	43
Кане М.М., Крайко С.Э., Раманович А.А. Зависимость шероховатости поверхности от режимов лазерного упрочнения	45
Керель А.Д., Ванюк Э.А., Соколов И.О. Исследование твердости полимерных газотермических покрытий	47
Комаров А.И., Орда Д.В., Сосновский И.А., Куриленок А.А. Анализ структуры покрытия на основе системы Zn-Al-Si-Cu, полученного методом центробежной индукционной наплавки	50
Костюкевич П.А., Кузей А.М., Лебедев В.Я., Францкевич А.В. Алмазоабразивный инструмент для обработки сверхтвёрдых материалов	52
Кульгейко М.П., Петришин Г.В., Кульгейко Г.С. Фактор инверсионности магнитно-электрических способов обработки как предпосылка реализации совмещенной технологии	54
Лебеденко О.С. Современные проблемы и возможности в области измерения поверхности и формы	56
Минько Д.В., Шиманович О.А. Применение электроимпульсного воздействия в процессе пластического деформирования тугоплавких металлов	58
Миранович А.В., Акулович Л.М. Совмещенная упрочняющая обработка цилиндрических наружных поверхностей деталей	60
Михайлов М.И., Кирпичев Е.А., Лукьянчик К.В., Мякенький А.Г. Исследование точности обработки концевыми фрезами	62
Михайлов М.И., Никитенко Д.В., Тетерич Н.Э. Расчет длины срезаемого слоя при вихревой обработке	64
Пилипчук Е.В. Влияние химического состава проволочного ворса на химический состав покрытия, сформированного методом деформационного плакирования гибким инструментом	66
Пилипчук Е.В., Шелег В.К., Леванцевич М.А., Кравчук М.А. Коррозионная стойкость электродеформационно плакированных хромовых покрытий в соляном тумане	68
Польский Е.А., Абрамов Р.В., Матросова К.А. Исследование технологического обеспечения установленных параметров долговечности детали «Башмак направляющий»	70
Польский Е.А., Воронина И.Д., Ромашенкова А.А. Исследование технологического обеспечения заданных технических и эксплуатационных характеристик детали «Корпус насоса»	72
Попок Н.Н., Портянко С.А., Гвоздь Г.И., Тихон Е.М., Бабашинский М.А. Система проектирования блочно-модульных режущих инструментов	74
Савицкий В. В., Савицкий И.В. Актуальные направления цифровизации конструкторско-технологической подготовки производства на металлообрабатывающих и машиностроительных предприятиях республики	76

Синькевич Ю.В. Процесс комбинированной очистки-полирования деталей в ремонтном производстве	82
Синькевич Ю.В. Технология химической очистки и обезжиривания поверхности деталей и узлов	85
Сорокин С.В., Абрамов Е.А., Баранова Е.А. Автоматизированная графическая библиотека элементов планировок рабочих мест	88
Сорокин С.В., Васильева Д.Е., Федонина Д.П. Автоматизация расчета режимов резания при зубофрезеровании червячными фрезами	90
Швец И.В., Девойно О.Г., Кардаполова М.А. Оптимизация режимов упрочнения зубчатых колес лазерной закалкой сканирующим излучением	92
Щукин В.Я., Кожевникова Г.В., Дубенец С.С. Построение поверхности пластичности сплава Cr20Ni50Mo3 в области параметров горячего пластического течения	94
Цитович Б.В., Соломахо В.Л., Соколовский С.С. Проблемы метрологического обеспечения измерительного контроля	97
Сакович Н.А. Упрочнение наплавленных цилиндрических поверхностей термомеханической обработкой	100
Василевич Ю.В., Неумержицкая Е.Ю., Москалев С.А., Братковский К.А., Лелес Д. Методика расчета конструктивных элементов машиностроения с учетом ползучести материала	101
Ажар А.В., Осадчий Е.Н., Ишкуло П.Ю. Анализ операции затылования стандартных дисковых модульных фрез методом 3D-моделирования	104
Нисс В.С., Алексеев Ю.Г., Королёв А.Ю., Калиниченко А.С., Будницкий А.С., Сенченко Г.М. Упрочнение поверхности титана с применением электролитно-плазменного нагрева	107
Королёв А.Ю., Нисс В.С., Алексеев Ю.Г., Паршутто А.Э., Будницкий А.С. Полирование металлических материалов в управляемых импульсных режимах электролитно-плазменной обработки	110
Нисс В.С., Алексеев Ю.Г., Королёв А.Ю., Паршутто А.Э., Сорока Е.В. Получение оксидных покрытий на поверхности вентильных металлов с применением высокочастотного импульсного микродугового оксидирования	112
Алексеев Ю.Г., Нисс В.С., Королёв А.Ю., Сенченко Г.М., Паршутто А.Э., Янович В.А. Формирование светопоглощающих покрытий на внутренних поверхностях длинномерных трубчатых изделий микродуговым оксидированием	114

## МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ШТОКОВ ГИДРОЦИЛИНДРОВ

Акулович Л.М., Сергеев Л.Е., Званский Н.Д.

Белорусский государственный аграрный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Гидроцилиндры применяют в гидросистемах для привода рабочих органов мобильных машин и исполнительных механизмов промышленного оборудования [1]. Высота неровностей наружных рабочих поверхностей штоков гидроцилиндров после хромирования и полирования должна быть не более  $Ra\ 0,160$  мкм, а рабочих поверхностей гильз – не более  $Ra\ 0,320$  мкм.

Из финишной обработки в условиях серийного и индивидуального производства наибольшее применение получила машинно-ручная доводка и полирование с использованием в качестве режущего инструмента наждачной бумаги типа Л1Э620×50П215А25-НМА ГОСТ 6456-82 622 или полирование войлочными кругами с использованием различных абразивных паст. Указанные методы финишной обработки являются трудоемкими и не обеспечивают стабильности шероховатости обрабатываемой поверхности и трудно поддаются автоматизации. Это приводит к необходимости поиска новых методов финишной обработки поверхностей штоков гидроцилиндров как хромированных поверхностей, так и под хромирование. Одним из прогрессивных методов финишной обработки деталей машин является магнитно-абразивная обработка (МАО) [2].

Экспериментальные исследования МАО штоков гидроцилиндров

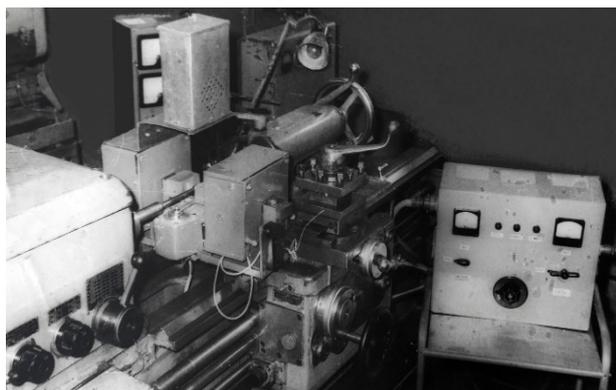


Рисунок 1 – Фотография установки для магнитно-абразивной обработки

проводились на установке СФТ 2.150.00.00.000 (рисунок 1) при наличии бункера-дозатора для подачи ферроабразивного порошка (ФАП) в зону обработки (на рисунке не показан). В качестве ФАП использовали порошок Ж15КТ ТУ 6-09-483-81, размерность частиц ФАП составляла (0,16...0,2) мм. Смазочно-

охлаждающее технологическое средство – СинМА 1 ТУ 38-5901176-91, 3% водный раствор. Технологические режимы обработки: напряжение на катушках 24 В; величина тока в катушках электромагнитов 2 А; масса порции ФАП (0,012...0,024) кг; скорость резания 2 м/с; частота осцилляции 1420 дв.ход/мин; амплитуда осцилляции 3 мм; величина рабочего зазора 1,5 мм; магнитная индукция (0,6...1,0) Тл; время обработки (60...210) секунд.

Образцами служили штоки гидроцилиндров, изготовленные из стали 20Х ГОСТ 4543-71. Образцы подвергали термообработке до HRC 61-64. Подготовка поверхности под хромирование включала операции шлифования и МАО до получения шероховатости поверхности не более  $Ra$  0,8 мкм. Шероховатость образцов измеряли до и после обработки в трех разных сечениях на профилографе-профилометре 252-Калибр. В каждом сечении делали по 4 замера. По результатам замеров каждого образца находили среднеарифметическое значение шероховатости его поверхности.

Толщина покрытия из хрома составляла (0,02...0,03) мм. Шероховатость поверхности образцов после хромирования составила  $Ra$  (0,32...0,63) мкм. Для практического использования метода МАО штоков гидроцилиндров проведены исследования влияния времени обработки на шероховатость поверхности до и после МАО. Остальные параметры оставались неизменными в течение обработки всей партии образцов. Установлено, что МАО поверхностей штоков гидроцилиндров до хромирования обеспечивает за 90 секунд обработки снижение шероховатости с  $Ra$  0,8 мкм до  $Ra$  0,2 мкм. Результаты исследований шероховатости хромированной поверхности представлены в таблице.

Таблица – Шероховатость по параметру  $Ra$  хромированной поверхности штоков гидроцилиндров до и после МАО

Время обработки $t$ , сек	Шероховатость поверхности до МАО $Ra_1$ , мкм	Шероховатость поверхности после МАО $Ra_2$ , мкм
60	0,75	0,54
90	0,76	0,34
120	0,71	0,32
150	0,79	0,25
180	0,74	0,23
210	0,77	0,20

Проведенные исследования МАО поверхности штоков гидроцилиндров показали, что при продолжительности обработки в диапазоне (60...150) секунд шероховатость поверхности уменьшается на 54%. При дальнейшем увеличении продолжительности обработки до 210 секунд шероховатость поверхности уменьшается на 61%. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что использование метода МАО для штоков гидроцилиндров до и после хромирования обеспечивает высокое качество обработки для хромированных с  $Ra$  (0,32...0,63) мкм до  $Ra$  0,2 мкм.

1. Санкович, Е. С. Гидравлика, гидравлические машины, гидроприводы: учеб. пособие / Е. С. Санкович, А. Б. Сухоцкий. – Минск: БГТУ, 2005. – 137 с.
2. Акулович, Л. М. Основы профилирования режущего инструмента при магнитно-абразивной обработке / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. – Минск : БГАТУ, 2014. – 280 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Белоцерковский М.А., Грищенко А.О

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Композиты инструментального назначения на полимерной основе составляют половину от общего количества производимых абразивных изделий. Отличительной положительной особенностью технологии их получения является возможность производства при значительно (в 1,5 - 3 раза, а в некоторых случаях на порядок) более низких температурах, чем на металлической или керамической основах. Помимо того, абразивный инструмент на полимерной основе за счет присущих высокомолекулярным соединениям, по сравнению с металлическими и керамическими связками, эластичности и упругости, обладает более выраженной способностью к самозатачиванию [1].

Основным недостатком известных абразивно-полимерных композиций является недостаточная прочность материала инструмента, которая диктуется требованиями безопасности вследствие высоких скоростей вращения и наличия неуравновешенности у изнашиваемых композитов. Кроме того, изнашиваемые поверхности этого инструмента не восстанавливаются.

Целью выполняемых исследований, некоторые результаты которых приведены в данной работе, является исследование возможности изготовления абразивного инструмента путем газопламенного напыления полимер-абразивной порошковой шихты на металлическую основу. При реализации такой технологии решаются проблемы многократного восстановления рабочей поверхности инструмента и его прочностных характеристик.

Для составления напыляемой смеси использовали порошки карбида кремния черного марки 54С с размером частиц 0,6 – 0,8 мм и 1,0 – 1,2 мм, а также порошок сверхвысокомолекулярного полиэтилена марки GUR 4120 UHMWPE фирмы “Celanese” (Германия) с молекулярной массой  $4,4 \cdot 10^6$  г/моль. Напыление осуществлялось на газопламенном аппарате модели ОИМ 050 конструкции Объединенного института машиностроения НАН Беларуси при рабочем давлении пропана 0,16 – 0,18 МПа, воздуха 0,35 – 0,40 МПа. На первом этапе исследований было определено рациональное значение соотношений размеров частиц полимера и абразива. При этом соотношение воздуха и пропана в смеси составляло 26:1, а скорость охлаждения покрытия не превышала 5 град/сек. Определялась работоспособность абразив-полимерного слоя и производительность напыления, оцениваемая как масса покрытия,

нанесенная за 8 секунд и переведенная в кг/ч. Прочность сцепления нанесенных покрытий на отрыв нормально приложенной нагрузкой составила около 7 МПа.

Для сравнительной оценки работоспособности абразив-полимерных покрытий (60 об.% СВМПЭ + 40 об.% SiC) пластины с покрытиями устанавливались в модернизированную машину трения СМЦ-2 и прижимались с усилием 150 Н к диску шириной 10 мм, изготовленному из стали Ст.3. Диск вращался со скоростью 300 об/мин и изнашивался о пластину с покрытием. Продолжительность испытаний каждой пластины 300 секунд. Перед испытаниями и после испытаний диски и пластины с покрытиями взвешивались на лабораторных весах ML-300 (Mettler Toledo) и определялась потеря массы в %. Результаты исследований приведены в таблице.

№	Размер частиц абразива, (D) мм	Размер частиц полимера, (d) мкм	Соотношение размеров в d/D	Потеря массы, %		Производительность, напыления кг/ч
				пластин а с покрытием	диск	
1	0,6 – 0,8	50 – 63	0,08	0,21	1,42	3,2
2	0,6 – 0,8	63 – 100	0,12	0,21	1,41	3,2
3	0,6 – 0,8	100 – 120	0,16	0,24	1,33	3,1
4	0,6 – 0,8	120 – 160	0,20	0,28	1,32	2,9
5	0,6 – 0,8	160 – 200	0,26	0,30	1,08	2,6
6	0,6 – 0,8	200 – 315	0,36	0,36	0,95	2,1
7	0,6 – 0,8	315 – 400	0,50	0,39	0,74	1,6
8	1,0 – 1,2	50 – 63	0,05	0,20	1,39	3,1
9	1,0 – 1,2	63 – 100	0,07	0,21	1,38	3,0
10	1,0 – 1,2	100 – 120	0,10	0,22	1,36	3,0
11	1,0 – 1,2	120 – 160	0,13	0,24	1,33	2,9
12	1,0 – 1,2	160 – 200	0,16	0,25	1,30	2,8
13	1,0 – 1,2	200 – 315	0,23	0,27	1,28	2,5
14	1,0 – 1,2	315 – 400	0,33	0,33	1,10	2,1
15	1,0 – 1,2	400 – 500	0,41	0,35	0,91	1,5

Анализ результатов проведенных исследований показал, что наилучшей работоспособностью при сохранении достаточно высокой производительности напыления обладают покрытия, полученные напылением смеси, содержащей частицы полимера, размер которых не превышает 0,25 диаметра абразивных частиц.

1. Харьянова, Е.В. Разработка эластичных абразивно-полимерных композиций для изготовления полировально-шлифовального инструмента // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2018. - №1. – С. 327 – 329.

## ПРОИЗВОДСТВО СКАЛЬНЫХ РЕЗЦОВ ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТИ МЕТОДОМ ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКИ

**Белявин К.Е.<sup>1</sup>, Щукин В.Я.<sup>1</sup>, Кожевникова Г.В.<sup>1,2</sup>**

- 1) Белорусский национальный технический университет;
- 2) Физико-технический институт НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь

Многолетний опыт производства резцов для ОАО «Беларуськалий» в Беларуси методом поперечно-клиновой прокатки убедительно доказал, что этот метод является наиболее дешевым и эффективным способом производства для этой группы деталей: на рынке резец РС144-7В продается в эквиваленте 2,4 доллара США за резец против самого дешевого китайского за 4,0 доллара США. Режущая вставка резца РС144-7В изготавливается из инструментальной закаленной стали Р6М5, что значительно снижает взрывоопасность в шахтах. Режущая вставка запрессовывается в корпус, необходимость пайки отпадает, что удешевляет цену резца. Качество резцов отвечает ГОСТ Р 5147–97. В то же время стойкость резцов уже не удовлетворяет требованиям производителей. Наши предварительные эксперименты показывают, что стойкость резцов может быть повышена без существенного увеличения их стоимости.

Для повышения эффективности добычи калийных удобрений необходимо повысить качество инструмента для резки породы калийной соли – повысить стойкость инструмента и снизить усилия резания. Повышение стойкости инструмента обеспечивает два положительных эффекта: снижение себестоимости продукта и снижение простоев дорогостоящего горного оборудования при замене изношенного инструмента. Снижение усилия резания обеспечивает возможность увеличения производительности оборудования.

Одним из вариантов повышения стойкости резцов является лазерное легирование поверхности корпуса резца в его конусной части вблизи вставки из инструментальной стали Р6М5. Есть все основания считать, что данный метод позволит значительно улучшить физико-механические свойства державки резца и обеспечить высокие твердость и износостойкость поверхности.

Накопленный в Физико-техническом институте НАН Беларуси опыт по изготовлению деталей методом поперечно-клиновой прокатки позволил при разработке соответствующего инструмента, прокатывать основные типы резцов горнодобывающих комбайнов без применения токарной обработки. Данный метод является высокопроизводительным, и в сочетании с дополнительным лазерным упрочнением резца позволил создать комплексный технологический процесс изготовления нового вида износостойкого инструмента.

Боридный слой, полученный на оптимальных режимах обработки, образованный из обмазки на основе карбида бора, состоит из округлых включений, располагающихся на поверхности слоя, и эвтектики. Округлые

включения являются первичными кристаллами боридов с высокой твердостью. В свою очередь, округлая форма боридов определяет такую же форму кристаллов эвтектики. По сравнению с основным металлом слои имеют более низкую скорость травления, что свидетельствует об их высокой коррозионной стойкости. В результате данной обработки, кроме твердости, коррозионной стойкости, значительно повышается и теплостойкость стали 35ХГСА. При температуре отпуска до 650°C не происходит значительного снижения микротвердости в зоне легирования, после 4-х часового отпуска при 750°C микротвердость падает до 7000 МПа. Исследования на теплостойкость показывают тот факт, что интегральная микротвердость упрочненного слоя сохраняется до 600-650°C, высокая микротвердость отдельных структурных составляющих сохраняется и до более высоких температур.

Испытание резцов с лазерным напылением в условиях ОАО «Беларуськалий» показало увеличение их стойкости в 2–3 раза, однако данная технология не была внедрена на ОАО «Беларуськалий» по организационным причинам. В итоге легирование увеличивает стойкость резца в 2–3 раза при увеличении его цены на 10,5%.

В Китае во всех резцах используется твердый сплав и часто применяется защита корпуса резца от износа в виде наварки износостойкого электрода или пайки на боковой поверхности корпуса вставок из твердого сплава. Корпуса резцов изготавливают горячей штамповкой на прессах с последующей токарной обработкой на обрабатывающих центрах с ЧПУ. В отдельных конструкциях резцов применяют защиту для корпусов от интенсивного износа - используют твердосплавные вставки. Для предотвращения чрезмерного износа резцов при их работе иногда выполняются винтовые поверхности на боковой поверхности корпусов резцов для принудительного их вращения. Также иногда делают с этой целью сварку износостойкого электрода на боковой поверхности корпуса.

Одним из вариантов повышения стойкости резцов является применение опыта со сваркой износостойкой тонкостенной втулки с режущей частью корпуса резца методом деформационной сварки при поперечно-клиновой прокатке. Деформационная сварка (сварка давлением) представляет собой сварку однородных и разнородных металлов и сплавов с предварительным нагревом или без нагрева. По контактным поверхностям заготовок при определенных условиях происходит сварка, то есть устанавливаются межатомные связи.

Деформационная сварка происходит в едином технологическом цикле с формообразованием поковки поперечно-клиновой прокаткой. Получение качественного неразъемного соединения осуществляется за счет пластической деформации свариваемых частей при температуре горячей обработки давлением. Сварка происходит между слоями по поверхности их контакта. Данная разработка дает возможность выпускать детали с повышенными свойствами внешнего слоя режущей части корпуса резца при том, что сердцевина изготавливается из стали 35ХГСА обыкновенного качества.

## **МЕТОДИЧЕСКОЕ, АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БАЗИРОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ 3D-ПРИНТЕРОВ**

**Беляков Н.В.<sup>1</sup>, Попок Н.Н.<sup>2</sup>, Яснев Д.А.<sup>1</sup>, Эбако М.Э.<sup>1</sup>**

1) УО «Витебский государственный технологический университет»

Витебск, Республика Беларусь

2) УО «Полоцкий государственный университет»

Новополоцк, Республика Беларусь

Важнейшими параметрами качества деталей машин являются точность размеров и допусков взаимного расположения поверхностей. Если допуски взаимного расположения не обеспечены, то деталь неизбежно перейдет в неустранимый брак. Особое влияние на взаимное расположение слоев при аддитивном синтезе деталей на 3D-принтерах и, как следствие, на обеспечение точности допусков взаимного расположения поверхностей оказывают такие факторы как: качество сборки и калибровки принтера; конструкция и точность механических передач и приводов; конструкция и ориентация направляющих; ориентация модели детали при печати и др. Задачи обеспечения точности допусков взаимного расположения поверхностей деталей машин в аддитивном производстве должны решаться уже на этапе базирования (ориентации) модели детали в рабочей зоне принтера с помощью программ-слайсеров за счет выбора баз с учетом параметров геометрической точности принтера.

Во всех программах-слайсерах пользователь на основе собственного опыта и интуиции производит ориентирование (базирование) модели детали в рабочей зоне принтера. В литературных источниках по этой проблеме лишь приводится ряд (иногда исключая друг друга) рекомендаций общего характера, а также приводятся результаты экспериментальных исследований влияния параметров печати на точность размеров. Вопросы влияния различной ориентации детали в рабочей зоне 3D-принтера на обеспечение точности допусков взаимного расположения с учетом параметров геометрической точности принтера не рассматривались. Таким образом, целью работы является разработка методического, алгоритмического и программного обеспечения базирования моделей деталей машин в рабочей зоне 3D-принтеров на основе анализа их геометрической точности для обеспечения заданных чертежом допусков взаимного расположения.

В результате исследований уточнена система терминов проектного базирования [1] для аддитивного синтеза, которая за счет определения понятий геометрической модели детали, приоритетного допуска, состава и комплекта баз, схемы базирования позволила предложить последовательность процедур базирования (ориентации) моделей деталей машин в рабочей зоне 3D-принтеров. Последовательность процедур включает: определение, индентификацию и

ранжирование возможных составов баз ориентации конструктивных элементов, определение параметров геометрической точности 3D- принтера, формирование базовой системы координат (за счет наложения на модель геометрических связей) и ее привязку к системе координат 3D-принтера, что уже на стадии проектирования дает возможность оценить достижимость заданных чертежом допусков взаимного расположения конструктивных элементов, а также рекомендовать варианты ориентации модели детали в рабочей зоне 3D-принтера для обеспечения допусков взаимного расположения.

Формализация и алгоритмизация указанных процедур дали возможность создать автоматизированную систему (рисунок 1), позволяющую прогнозировать обеспечение точности допусков взаимного расположения поверхностей при 3D-печати, рекомендовать варианты базирования моделей деталей в рабочей зоне 3D-принтера на основе анализа его геометрической точности для обеспечения допусков взаимного расположения и, как следствие, снижать вероятность печати бракованных деталей.

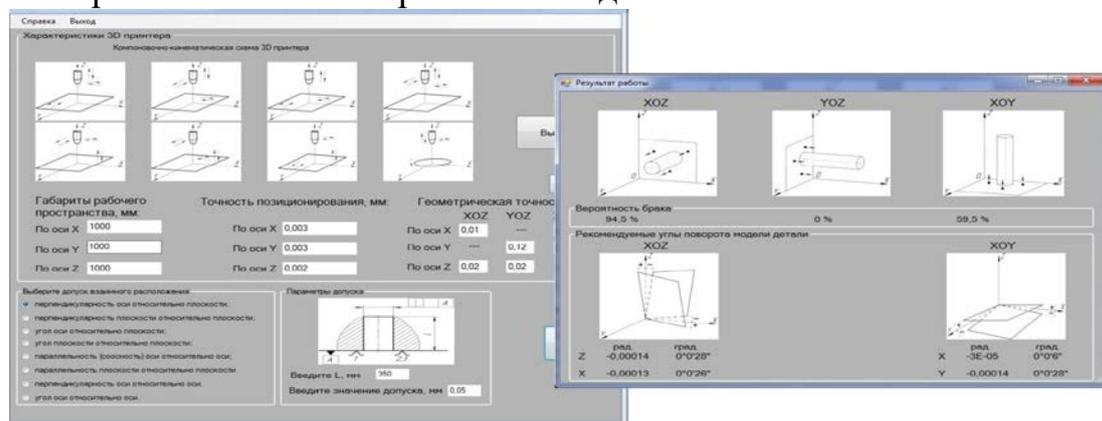


Рисунок 1 – Интерфейсы программного обеспечения

При работе с системой пользователь последовательно вводит информацию о компоновочно-кинематической схеме принтера, его точности позиционирования и геометрической точности по осям, параметрах поверхности с приоритетным допуском. Результатом работы являются сведения о возможности обеспечения допуска взаимного расположения на заданной длине при различном базировании модели детали относительно осей системы координат принтера, а также рекомендации о возможном повороте модели для обеспечения приоритетного допуска взаимного расположения. Результаты работы могут использоваться: в проектных бюро предприятий, использующих 3D-принтеры; ИТ-компаниях для создания и совершенствования программ-слайсеров; учебном процессе для подготовки специалистов в области производства изделий на основе трёхмерных технологий.

1. Попок, Н. Н. Практическое приложение теории базирования для синтеза универсально-сборных приспособлений / Н. Н. Попок, Н. В. Беляков, Ю. Е. Махаринский, Д. Г. Латушкин // Вестник ПГУ. – 2020. – № 11, Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – С. 21-31.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОУГЛЕРОДНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ (ЧАСТИЦАМИ ФУЛЛЕРЕНОВОЙ САЖИ)

Босяков А.В.<sup>1</sup>, Ванюк Э.А.<sup>1</sup>, Соколов И.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Белорусский Национальный Технический Университет

<sup>2</sup> УО «Республиканский институт профессионального образования»

По мере повышения скоростей перемещения узлов и механизмов, увеличения их размеров и повышения производительности оборудования, их условия работы становятся более тяжелыми. Выход из строя оборудования происходит по причине износа деталей узлов трения.

Долговечность деталей с упрочняющими покрытиями повышается в несколько раз по сравнению с серийно изготовленными, а это обеспечивает высокую надежность и увеличивает срок эксплуатации машин и технологического оборудования. Повышение износостойкости и антифрикционных свойств поверхностей трения актуально для многих отраслей техники. Не менее важной является проблема восстановления и упрочнения быстроизнашивающихся деталей, на замену которых ежегодно расходуются огромные средства. В зависимости от назначения, все покрытия, получаемые с помощью газотермического напыления должны обладать рядом стандартных свойств, к которым относятся: прочность сцепления нанесенного слоя с деталью, твердость, износостойкость и жаростойкость, плотность и пористость, коррозионная стойкость.

Цель исследования заключается в том, чтобы понять, как влияет добавление нанокремниевых компонентов в защитные покрытия, на микротвёрдость поверхности.

Газотермическое напыление используется для получения износостойких, коррозионностойких, жаропрочных, теплоизоляционных и других покрытий. Газотермическое напыление определено как получение покрытия из нагретых и ускоренных с применением высокотемпературной газовой струи частиц напыляемого материала, при соударении которых с деталью или напыленным материалом происходит их соединение путем металлургического взаимодействия и механического сцепления [1].

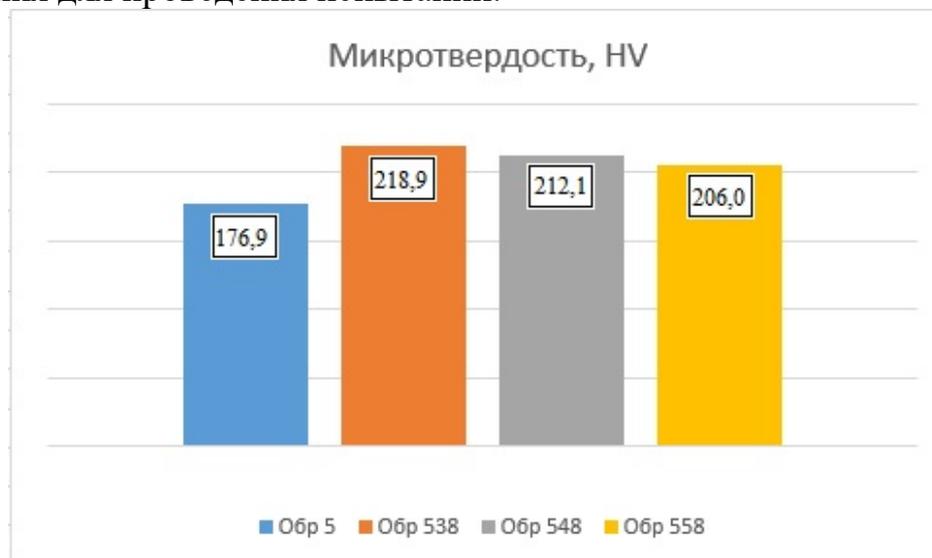
Производилось газотермическое напыление по предварительно подготовленной дробеструйной обработкой поверхности [3, 4]. Для газопламенного напыления порошков использовалась установка ТРУ-БПИ. [5]

Для измерений использовали твердомер Duramin Struers. Данное оборудование оснащено автоматическим нагружением индентора, выдержкой и разгрузкой, автоматическим тестированием нагрузок исключают отклонения в течении проведения измерений. Используемый твердомер представляет

современную технологию и соответствует действующим нормам и стандартам. Измерение микротвердости производилось по 25 точкам.

На основе анализа и теоретических исследований были выбраны материалы для формирования композиционных газотермических покрытий.

Изготовлены образцы для проведения исследований физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик композиционных покрытий, приспособления для проведения испытаний.



5 – покрытие из бронзы ПГ-19М-01 (основа Cu; 4% Fe; 8,5-10,5% Al) без добавок; 538 - покрытие из бронзы ПГ-19М-01 (основа Cu; 4% Fe; 8,5-10,5% Al) с добавкой масс. 0,1% фуллереновой сажи; 548 - покрытие из бронзы ПГ-19М-01 (основа Cu; 4% Fe; 8,5-10,5% Al) с добавкой масс. 0,5% фуллереновой сажи; 558 - покрытие из бронзы ПГ-19М-01 (основа Cu; 4% Fe; 8,5-10,5% Al) с добавкой масс. 1% фуллереновой сажи

Рисунок 1 – Гистограмма средних значений микротвердости образцов бронзы ПГ-19М-01

Результаты экспериментальных исследований позволили установить зависимость микротвердости покрытий из бронзы ПГ-19М-01 от содержания нанокремниевых компонентов фуллереновой сажи, которая позволила установить повышение микротвердости в 1,24 раза у покрытий из бронзы ПГ-19М-01 с добавкой масс. 0,1% компонентов фуллереновой сажи, в 1,20 раза у покрытий из бронзы ПГ-19М-01 с добавкой масс. 0,5% компонентов фуллереновой сажи, в 1,17 раза у покрытий из бронзы ПГ-19М-01 с добавкой масс. 1% компонентов фуллереновой сажи.

1. Черноиванов В.И. и др. / Восстановление деталей машин (Состояние и перспективы) / В.И. Черноиванов, И.Г. Голубев – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 376 с.
2. Т. В. Бухаркина, Н. Г. Дигуров.. Химия природных энергоносителей и углеродных материалов / — М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 1999. — 195 с.

3. Восстановление деталей машин: справочник / Ф.И. Пантелеенко [и др]; под ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672с.
4. Теория и практика газопламенного напыления / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Навука і тэхніка, 1993. – 295 с.
5. Газопламенное напыление и металлизация [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ecm-zink.ru/info/stati/gazoplammenoe-napylenie-i-metallizacziya.html>. Дата доступа: 30.10.2021.

**УДК 621.91.04**

## **АНАЛИЗ СХЕМ ТОЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ С РЕГУЛЯРНЫМ ПРОФИЛЕМ**

**Данилов А.А.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Традиционные схемы обработки некруглых цилиндрических и конических поверхностей с регулярным профилем основаны на сообщении инструменту (резцу, фрезе или др.) возвратно-поступательного движения, согласованного с вращением заготовки. Поэтому обработанная поверхность имеет регулярный профиль с равномерно расположенными по окружности выступами, количество которых равно отношению частот указанных движений. Недостатком таких схем обработки является наличие возвратно-поступательного движения инструмента, что отрицательно влияет на условия работы механизмов станка, точность и производительность обработки. В большей степени этот недостаток проявляется при некруглом точении призматическим резцом из-за совмещения движений профилирования и резания. Поэтому более эффективны схемы обработки поверхностей с регулярным профилем без возвратно-поступательного движения инструмента. К ним относится схема точения установленным с эксцентриситетом  $e$  относительно оси вращения круглым резцом (а.с. 982845 СССР), частота  $n_2$  вращения  $B_2$  которого (рисунок 1 а) в  $m$  раз больше частоты  $n_1$  вращения  $B_1$  заготовки  $I$ , где  $m$  – число выступов формируемого профиля, что ухудшает условия резания по сравнению с точением круглых поверхностей.

Указанное соотношение частот вращения заготовки и резца обуславливает повышенную скорость результирующего движения резания  $v$ , которая в рассматриваемой схеме равна геометрической сумме окружных скоростей вращения заготовки, тангенциального (вращательного) движения резца и движения подачи. Без учета (из-за малости) скорости движения подачи  $v = 2\pi n_1 \sqrt{r^2 + (m(R + e))^2}$  (1), где  $R$  – радиус круглого резца;  $r$  – радиус вписанной в формируемый профиль окружности, а расчетная частота вращения заготовки при заданной скорости резания  $v$  составляет

$$n_1 = \frac{v}{2\pi\sqrt{r^2 + (m(R + e))^2}} \cdot (2)$$

Высокая скорость тангенциального (вращательного) движения резца в рассмотренной схеме обработки отрицательно влияет на его стойкость и производительность по сравнению с ротационным точением круглых поверхностей. Повышение производительности точения поверхностей с регулярным профилем возможно за счет уменьшения скорости тангенциального движения резца.

На этом основан способ точения поверхностей с регулярным профилем круглым резцом (патент ВУ 21958), отличающийся от рассмотренного отсутствием жесткой связи между частотами вращения резца и заготовки, т.е. схемой резания. Поверхность 1 (рисунок 2), имеющую  $m$  равномерно расположенных по окружности выступов высотой  $h$  над вписанной в его поперечное сечение окружностью радиусом  $r$ , обрабатывают резцом 2 с режущей кромкой в виде окружности, центр  $C$  которой совмещен с осью 3, совпадающей с геометрической осью резца 2. Его устанавливают на оси 3 с возможностью свободного вращения  $B_4$  вокруг нее. Ось 3 жестко связана с параллельной ей осью 4 и отстоит от нее на расстояние  $e$  в 2 раза меньшее высоты выступа  $h$ .

В процессе обработки заготовке сообщают вращение  $B_1$  с частотой  $n_1$ , а оси 4 – вращение  $B_2$  с частотой  $n_2$ , согласованное с вращением  $B_1$  заготовки в соответствии с числом выступов  $m$ :  $n_2/n_1 = m$ .

Центр  $C$  окружности, ограничивающей режущую кромку круглого резца 2, вращаясь совместно с осью 4, движется по окружности радиусом, равным  $e$ , вследствие чего точка  $A$  режущей кромки, формирующей обработанную поверхность, совершает гармоническое возвратно-поступательное движение  $O_4$  перпендикулярно оси 5 с амплитудой, равной  $h$ . В результате сочетания движений  $B_1$  и  $O_4$  формируется регулярный профиль обработанной поверхности с равномерно расположенными по окружности выступами высотой  $h$ .

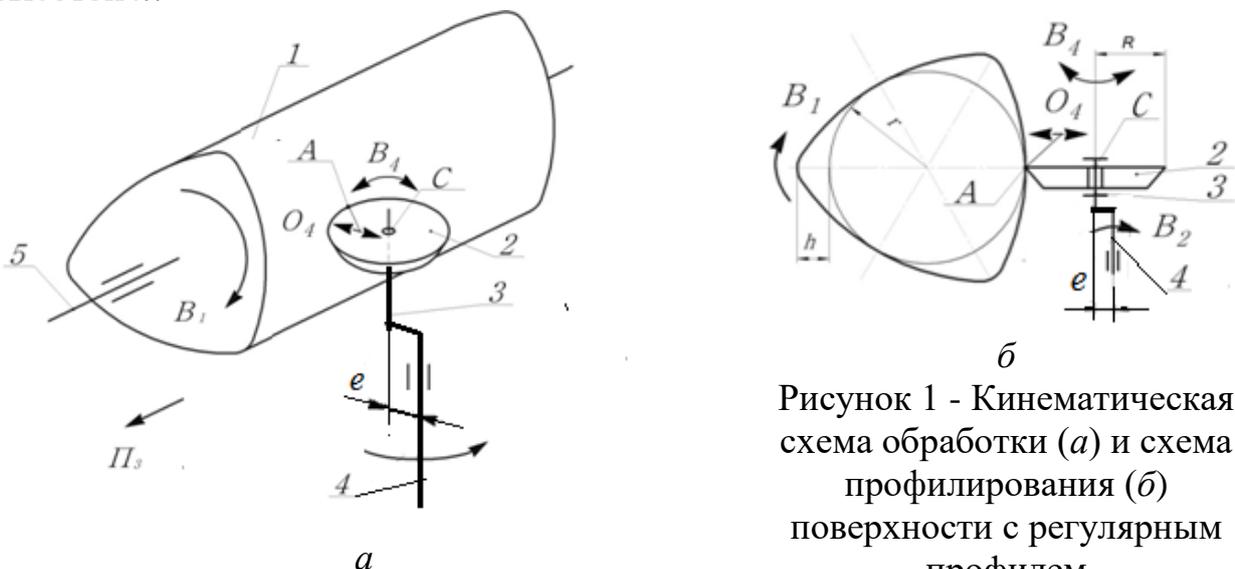


Рисунок 1 - Кинематическая схема обработки (а) и схема профилирования (б) поверхности с регулярным профилем

Частота вращения заготовки  $n_1^*$  в этом случае при той же скорости резания  $v$  составляет  $n_1^* = \frac{v}{2\pi r}$  (3). Следовательно, при одинаковой скорости резания частота вращения заготовки и, соответственно, производительность в  $\sqrt{1 + \left(m \frac{R+e}{r}\right)^2}$  раза больше, чем при обработке той же поверхности по первой схеме. Рассмотренная схема обработки реализуется на широкоуниверсальном станке модели ВС 50 и шлицефрезерных станках.

УДК 621.91.04

## СРАВНЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ МОМЕНТОПЕРЕДАЮЩИХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Данилов А.А.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Сложность станка для обработки моментопередающей поверхности (МП) существенно зависит от ее профиля, поэтому его обоснование имеет важное практическое значение. В неподвижных моментопередающих соединениях (МПС) обычно применяют самоцентрирующиеся под нагрузкой самотормозящие трехгранные профили (равноосный *PK-3* и синусоидальный *C-3*), а в подвижных соединениях – несамотормозящийся четырехгранный профиль типа *K* (Краузе). Поэтому руководящим документом РД 23.800.2.02-89 и стандартами Германии (DIN 32711-79, DIN 32712-79) рекомендуются профили типов *PK-3* и *K-4*, соответственно для неподвижных и подвижных ПМС. Технологическим преимуществом *PK-3* профиля, ограниченного кривой постоянной ширины (рисунок 1 *a*), является неизменность расстояния  $D$  между двумя любыми параллельными касательными  $T_1-T_1$ ,  $T_2-T_2$  к нему, что позволяет использовать стандартные средства измерения диаметральных размеров. Несущественно отличается от *PK-3* профиля неравноосный и потому более сложный в контроле *C-3* профиль.

В полярных координатах *PK-3* профиль описывается уравнением  $\rho = \sqrt{(R - e \cdot \cos t)^2 + (me \cdot \sin t)^2}$  (1), где  $\rho$ ,  $R$ ,  $e$ ,  $m$  – соответственно радиус-вектор, средний радиус, эксцентриситет, число сторон профиля;  $t$  – независимый параметр. Уравнение синусоидального профиля в полярных координатах  $\rho$ ,  $\varphi$  имеет вид  $\rho = R - e \cos m \varphi$  (2). Уравнения контурных кривых позволяют сравнить соответствующие профили по сложности формирования и контроля. Например, из (1) и (2) следует, что *C-3* профиль является более технологичным по сравнению с *PK-3* профилем, так как для его формирования требуется меньшее количество настраиваемых параметров, т.е. более простой станок.

Заслуживает внимания еще редко применяемый профиль МПС в виде треугольника Рело (P-3 профиль), образуемый пересечением трёх одинаковых кругов радиусом  $R$  (рисунок 1 б) с центрами в вершинах правильного треугольника  $ABC$ , которые расположены на описывающей окружности радиусом  $R_0$ . Стороны треугольника Рело касаются вписанной в его окружности диаметром  $d$ .

Треугольник Рело является простейшей после круга фигурой постоянной ширины, т.к. расстояние между двумя любыми параллельными касательными  $T_1-T_1$  и  $T_2-T_2$  к ней, как и для PK-3 профиля, постоянно и равно  $R$  (см. рисунок 1 б). Это расстояние называется шириной  $b$  треугольника Рело, следовательно,  $b=R$ .

Через  $b$  выражаются другие параметры треугольника Рело: радиус  $R_0$  (диаметр  $D$ ) описанной окружности  $R_0 = \frac{b}{\sqrt{3}}$ ; (3) и радиус  $r$  (диаметр  $d$ ) вписанной окружности  $r = b \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right)$  (4). Зависимость (4) позволяет определить ширину треугольника Рело по результатам измерения радиуса  $r$ , при невозможности ее непосредственного измерения, например, если профиль детали срезанный.

Следует отметить, что по сравнению с C-3 и PK-3 профилями P-3 профиль имеет существенно меньший угол при вершине, равный  $120^\circ$ . Поэтому, как показали расчеты МКЭ, при нагружении одинаковым крутящим моментом различных ПМС типа вал-втулка с равной площадью поперечного сечения, в соединении с P-3 профилем распорное усилие в 3 раза меньше, чем в соединениях с PK-3 и C-3 профилем. Соответственно, уменьшаются контактные напряжения, деформации и сила трения, и повышается долговечность ПМС, исключается возможность самоторможения, что является эксплуатационным преимуществом ПМС с P-3 профилем. Это позволяет применять профиль в виде треугольника Рело, в отличие от PK-3 профиля, как в подвижных, так и неподвижных ПМС. Поэтому отпадает необходимость применения двух типов ПМС, как это принято в машиностроении Германии, что упрощает конструкцию трансмиссий машин с ПМС.

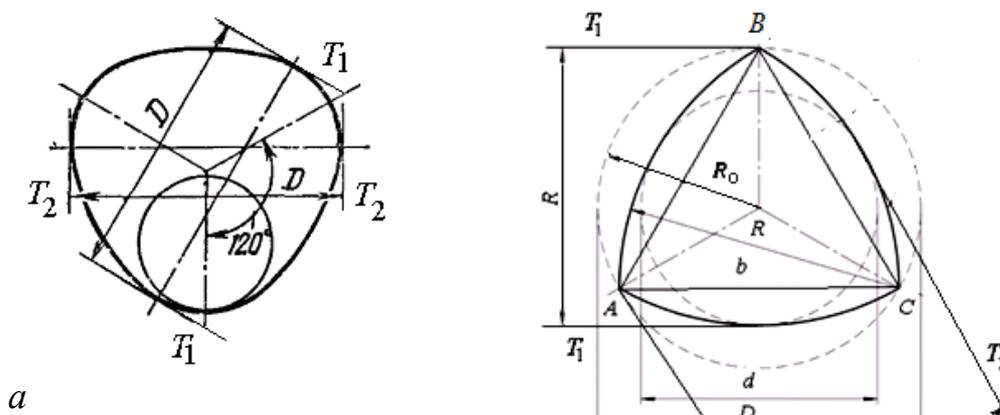


Рисунок 1 – Геометрия  
равноосных *РК-3* (а) и  
*Р-3* (б) профилей:

Технологическим преимуществом *Р-3* профиля по сравнению с *РК-3* профилем является возможность обработки МП с таким профилем на различных универсальных станках без их модернизации разработанными способами (патент ВУ 22235 и Евразийский патент № 034377).

УДК 621.91.04

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОГО СТРУЖКОДРОБЛЕНИЯ СОВМЕЩЕНИЕМ ПРОЦЕССОВ ЧАСТИЧНОГО И ПОЛНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

**Данилов В.А.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Классическая схема ротационного точения характеризуется постоянным точечным контактом режущей кромки круглого резца с номинальной поверхностью изделия, поэтому достигается её полное формообразование вдоль траектории исполнительного движения. Однако при обработке пластичных материалов затруднено стружкодробление, что ограничивает область применения прогрессивного метода обработки. Особенности ротационного точения позволяют осуществить стружкодробление специфическими для данного вида обработки методами, основанными на изменении одного или одновременно нескольких признаков, определяющих его классическую схему. К ним относятся: неравномерное вращение резца, вращение его вокруг оси, не совпадающей с геометрической осью, применение резцов с переменными параметрами режущей части (прерывистая режущая кромка, переменные передний угол и угол наклона режущей кромки). Однако, эти методы или сложны в реализации или ухудшают качество обработки. Поэтому предпочтительно обеспечение надежного стружкодробления применением комбинированной обработки, основанной на совмещении процессов частичного и полного формообразования обработанной поверхности. Такое совмещение позволяет создавать комбинированные методы размерной обработки с более высокими технико-экономическими показателями, так как при формообразовании поверхности одновременно несколькими методами объединяются преимущества совмещаемых методов:

надежное стружкодробление при обработке любых материалов методами частичного формообразования и высокая точность геометрического или кинематического формования производящих линий поверхности методами полного формообразования. На этом принципе основаны прогрессивные схемы обработки цилиндрических поверхностей ротационными инструментами. Рассмотрим пример его реализации.

На рисунке изображена схема обработки цилиндрической поверхности комбинированным инструментом, содержащим круглый резец 2 с непрерывной режущей кромкой и установленный над ним многозубый инструмент 3 (а.с. 891219 СССР), передний и задний углы режущих лезвий которого отличаются на величину угла  $\eta$  от соответствующих углов резца 2. В процессе обработки заготовке 1 сообщается вращательное движение  $B_1$ , а комбинированному инструменту – продольная подача  $\Pi_3$  и непрерывное вращение  $B_2$  с частотой и по направлению, обеспечивающими максимальную его стойкость. Окончательное формообразование цилиндрической поверхности осуществляется непрерывно круговой режущей кромкой резца 2. Режущие лезвия инструмента 3 вступают в работу периодически и срезают металл на некотором угле поворота заготовки одновременно с резцом 2.

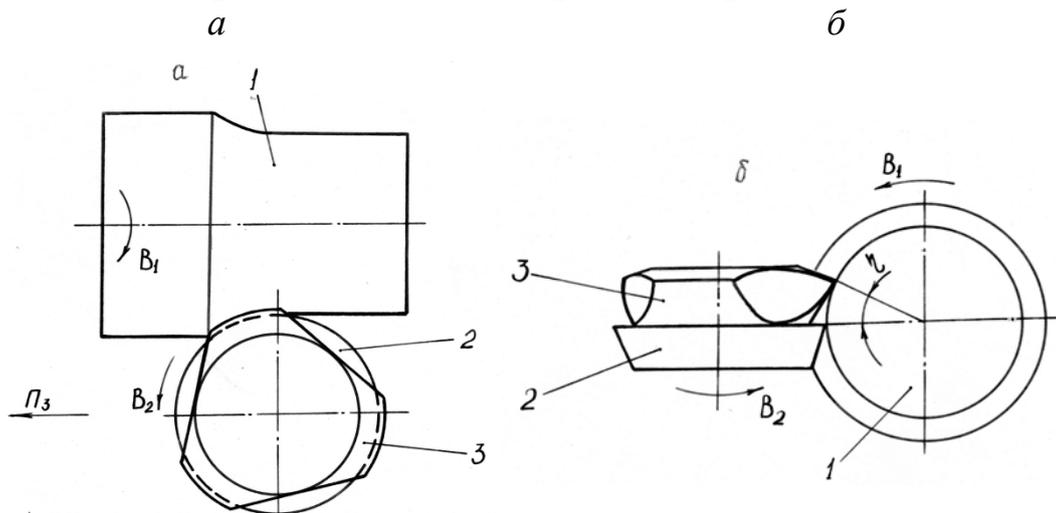


Рисунок 1 – Кинематическая схема обработки (а) и схема установки комбинированного инструмента (б) при совмещении процессов частичного и полного формообразования цилиндрической поверхности

Благодаря периодическому перераспределению глубины резания между режущими лезвиями инструментов 2 и 3 достигается устойчивое дробление стружки. Управление стружкодроблением (длиной стружки) осуществляется за счет числа и формы режущих лезвий инструмента 3. Если они имеют участки с круговой режущей кромкой, как показано на рисунке, то количество элементов стружки, образуемых за один оборот комбинированного инструмента, в 2 раза больше числа режущих лезвий инструмента 3, так как дробление стружки осуществляется каждый раз при выходе из зоны резания режущей кромки нижнего или верхнего инструмента. Если же эти режущие лезвия

островершинные, то минимальное число стружек, образуемых за один оборот инструмента равно числу режущих лезвий, что позволяет управлять длиной стружек. Описанная схема обработки реализуется на специальных станках для ротационного точения роторов электродвигателей с принудительным вращением инструмента.

В рассмотренной схеме обработки инструменты 2 и 3 занимают неизменное положение относительно друг друга, поэтому нагрузка на резец 2 вдоль его режущей кромки переменна, что обуславливает ее неравномерное изнашивание. Поэтому для повышения стойкости резца 2 и точности формообразования рекомендуется периодически или непрерывно поворачивать многозубый инструмент 3 вокруг оси вращения комбинированного инструмента.

**УДК 621.91.04**

## **ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СИНТЕЗЕ СХЕМЫ ОБРАБОТКИ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

**Данилов В.А.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Любая криволинейная поверхность может быть обработана при различных направлениях относительного перемещения заготовки и инструмента, обеспечивающих различную производительность при заданной погрешности формообразования. Например, выпуклая поверхность может быть образована инструментом с выпуклым, прямым или вогнутым характеристическим образом при различных направлениях его перемещения. Поэтому определение рациональной схемы обработки связано с анализом возможных сочетаний форм образующей номинальной поверхности и характеристического образа инструмента, а также направлений движения формообразования. Обоснование направления этого движения при синтезе схемы обработки криволинейной поверхности имеет важное практическое значение, например, при разработке управляющей программы станка с ЧПУ.

В наиболее распространенной схеме обработке криволинейной поверхности строчками, например, концевой сферической фрезой, рациональное направление движения формообразования может быть установлено по критериям непрерывности процесса обработки и оптимального контакта номинальной и элементарных поверхностей, образующих обработанную поверхность с допускаемыми отклонениями от номинальной поверхности. Если выполнение каждого из этих критериев возможно лишь при различных направлениях движения формообразования, то для выбора из них

рационального служит обобщенный критерий, которому соответствует максимум значения  $K_u / |K_1 + K_2|$ , где  $K_u$  – коэффициент цикловой непрерывности;  $K_1$  ( $K_2$ ) – кривизна образующей номинальной (элементарных) поверхностей, соответственно.

Коэффициент цикловой непрерывности, равный отношению времен рабочих и холостых ходов, при обработке поверхности площадью  $F$  и шириной  $b$  строчками определяется по формуле

$$K_u = 1 / (1 + \mu c + bvt_{II} / F), \quad \text{где} \quad \mu = v / v_x; c = \sum l_{xi} / \sum l_{pi}; v_x, l_x: \quad v, l_p -$$

соответственно скорость и длина холостого и рабочего ходов.

Учитывая, что производительность формообразования  $Q$  пропорциональна величине  $lK_u$ , где  $l$  – ширина образующей элементарной поверхности, эффективность выбранного направления движения формообразования количественно характеризуется отношением  $K_Q$  значений производительности формообразования  $Q$ , соответствующих различным (обозначенным далее 1 и 2) направлениям этого движения:

$$K_Q = Q_2 / Q_1 = l_2 K_{u2} / (l_1 K_{u1}) \quad \text{или} \quad K_Q = \frac{1 + \mu + b_1 vt_{II} / F}{1 + \mu + b_2 vt_{II} / F} \sqrt{\frac{|K_1 + K_2|_1}{|K_1 + K_2|_2}}.$$

Рациональное сочетание форм образующих номинальной и элементарных поверхностей при выборе рационального направления траектории движения формообразования определяется на основе исследования геометрии номинальной поверхности изделия и форм ее контакта с инструментальной поверхностью с учетом того, что условием выполнения критерия оптимального контакта является минимум модуля алгебраической суммы кривизн  $|K_1 + K_2|$  указанных образующих при обеспечении проходимости инструмента. Например, для наиболее часто встречающегося случая обработки криволинейных поверхностей, когда образующая элементарных поверхностей может быть только выпуклой, за образующую номинальной поверхности следует принимать линию минимальной (с учетом знака) кривизны в зоне контакта с образующей элементарной поверхности, что может быть обеспечено выбором направления траектории движения формообразования. Если образующая номинальной поверхности выпуклая, то у элементарной поверхности, для выполнения критерия оптимального контакта, она должна быть вогнутой или прямой, что обеспечивается профилированием инструмента.

Потоянство формы контакта инструмента и формируемой поверхности для повышения и стабилизации точности формообразования на всей площади обработанной поверхности достигается управлением в процессе обработки характеристическим образом инструмента, что должно обеспечиваться выполнением формообразующей системой станка необходимых ориентирующих движений, что возможно на многоосевых станках.

Приведенные рекомендации справедливы при равенстве для сравниваемых вариантов значений коэффициента цикловой непрерывности. В иных случаях направление движения формообразования должно выбираться с

учетом приведенного выше обобщенного критерия. Если номинальная поверхность изделия представляет сочетание различных типов поверхностей, то отдельные её участки могут обрабатываться по соответствующим рациональным схемам, что обеспечивается управляющей программой. При этом возможность реализации множества необходимых схем обработки этих участков поверхности должна быть обеспечена при проектировании формообразующей системы станка или при выборе существующего станка.

Таким образом, рациональное направление движения формообразования при синтезе схемы обработки криволинейной поверхности определяется по установленным критериям на основе исследования геометрии номинальной поверхности изделия и возможных форм контакта с ее образующей характеристического образа инструмента с учетом компоновки и технологических возможностей станка.

**УДК 621.91.04**

## **РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПАЗОВ НА ТОРЦАХ КОЛЬЦЕВЫХ ДЕТАЛЕЙ**

**Данилов В.А.<sup>1</sup>, Наранович В.Ф.<sup>2</sup>**

- 1) Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь
- 2) ООО «Станкрим», Минск, Республика Беларусь

В различных изделиях машиностроения широко применяются кольцевые детали с равномерно расположенными на торце пазами (кулачковые и храповые муфты, делительные устройства, индукторы АБС и т.п.) Последовательная обработка пазов обеспечивается за счет движения деления – поворота заготовки вокруг ее оси. Применяемые технологии обработки пазов разными методами и инструментами основаны обычно на прерывистом движении деления, что отрицательно влияет на производительность и точность расположения пазов по окружности. Улучшение этих характеристик обеспечивают схемы обработки пазов с непрерывным движением деления, совмещенным с процессом резания [1]. В этой связи совершенствование технологии обработки пазов на торцах деталей связано с разработкой, анализом и реализацией таких схем обработки.

Совмещение процессов формообразования и деления обеспечивают схемы обработки пазов резцовыми головками, когда профиль паза формируется методом копирования за счет формы режущих лезвий резцовой головки, а боковые поверхности пазов – методом следа при перемещении режущего лезвия относительно заготовки по соответствующей траектории. При согласованных вращательных движениях заготовки и резцовой головки в зависимости от параметров схемы обработки траектория движения формообразования может быть дугой окружности, эллипса или иной кривой,

что позволяет обрабатывать пазы с выпуклыми, вогнутыми или близкими к плоским боковыми сторонами.

Вращательные движения резцовой головки и заготовки могут осуществляться вокруг параллельных или перпендикулярных осей. Преимущество схем обработки с параллельными осями состоит в возможности управления шириной и формой боковых сторон пазов, имеющих плоское основание. Схема обработки с такими возможностями реализуется на отечественном зубошлицефрезерном станке модели ВС 50, современных многооперационных токарных станках с ЧПУ с функцией полигонального точения, станках-профиляторах фирмы WERA (Германия), что исключает необходимость в специальных станках.

В процессе обработки заготовке 1 (рисунок 1 а) и резцовой головке 2 сообщаются вращательные движения соответственно  $B_1$  и  $B_2$  вокруг их параллельных осей 5 и 3 и относительное движение врезания  $P_3$ . В классической схеме обработки расстояние между указанными осями равно радиусу резцовой головки. Форма обработанных пазов в этом случае зависит от отношения  $i$  угловых скоростей движений  $B_1$  и  $B_2$ . В частности, при  $i=2$  и одинаково направленных вращательных движениях инструмента и заготовки точки режущей кромки перемещаются по эллиптическим траекториям. С увеличением радиуса резцовой головки траектория приближается к прямой, что позволяет обрабатывать с допустимой погрешностью пазы с плоскими боковыми сторонами.

Так как  $i=2$ , то в этом случае число пазов в 2 раза больше числа резцов в головке и поэтому возможна обработка изделий только с четным числом пазов. При соответствующей настройке расстояния между осями 3 и 5 и значения  $i$  обеспечивается возможность обрабатывать изделия с нечетным числом пазов, имеющих выпуклые, вогнутые или близкие к плоским боковые стороны.

В рассмотренной схеме обработки профиль паза формируется методом копирования, что ограничивает ее технологические возможности по ширине пазов, так как с ее увеличением возрастает сила резания, вследствие чего снижается виброустойчивость станка. Для устранения этого недостатка целесообразно формировать паз по ширине не методом копирования, а сочетанием методов копирования и следа. На этом основана схема обработки пазов на торцах деталей (а.с. 1798055 СССР), согласно которой требуемая ширина паза обеспечивается не за счет ширины лезвия инструмента, а кинематически, путем сообщения заготовке после движения врезания дополнительного вращения  $B_4$  для формирования паза по ширине (рисунок 1, б).

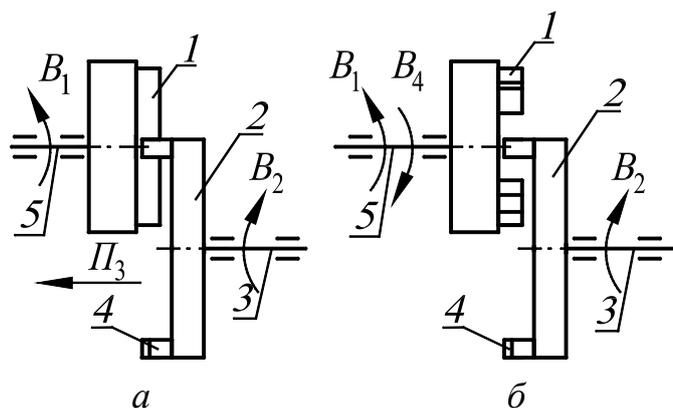


Рисунок 1 – Схемы обработки пазов на торце детали с формированием их по ширине методом копирования (а) и сочетанием методов копирования и следа (б)

Тем самым обеспечивается возможность обрабатывать пазы, ширина которых не зависит от геометрии режущих зубьев, что позволяет обрабатывать одним инструментом пазы разной ширины, обеспечивает универсальность инструмента.

УДК 621.791.72

## ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВАЛИКОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ С ПОПЕРЕЧНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ

Девойно О.Г., Шелег В.К., Кардаполова М.А., Луцко Н.И.,  
Пилецкая Л.И.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Покрытия, нанесенные лазерной наплавкой, отличаются высокой износостойкостью, коррозионной стойкостью, стойкостью к окислению. Это предопределено небольшими размерами зерна, низкой степенью диффузии, небольшим количеством дефектов и высокой прочностью сцепления, присущими покрытиям, полученным этим методом. Такие свойства лазерной наплавки способствуют ее широкому применению при ремонте и упрочнении деталей в различных отраслях промышленности [1].

Современные волоконные лазеры в сочетании с компьютерными системами программируемого сканирования позволяют решить проблему распределения сфокусированного излучения на достаточно большой площади с возможностью управления в онлайн режиме. При этом появляется возможность повышения производительности и стабильности процесса наплавки [2].

В данной статье изучается влияние режимов лазерной наплавки с поперечным сканированием на геометрию единичных валиков.

Единичные валики наносились на образцы из стали 45 на лазерном комплексе, включавшем волоконный лазер YLR-1 мощностью 1000 Вт, координатную систему с ЧПУ, программируемый 2D сканер, порошковый питатель и щелевую головку для лазерной наплавки. Материалом для наплавки валиков являлся порошок никелевого сплава ПГ-12Н-01. Геометрические параметры валиков измерялись при помощи металлографического микроскопа Микро Р200.

Установлено (рис. 1), что ширина валиков уменьшается при увеличении скорости наплавки при любых площадях пятна сканирования. Это объясняется тем, что увеличение скорости наплавки уменьшает удельную энергию, поглощаемую подложкой, за счет чего диаметр ванны расплава на подложке, а, соответственно, и ширина валика уменьшаются.

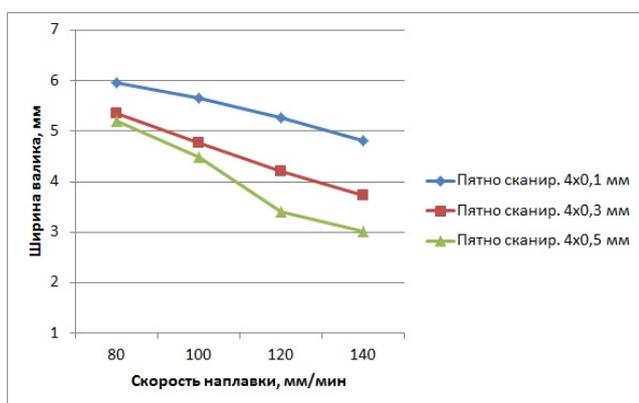


Рис. 1. Зависимости ширины валиков наплавки от скорости наплавки

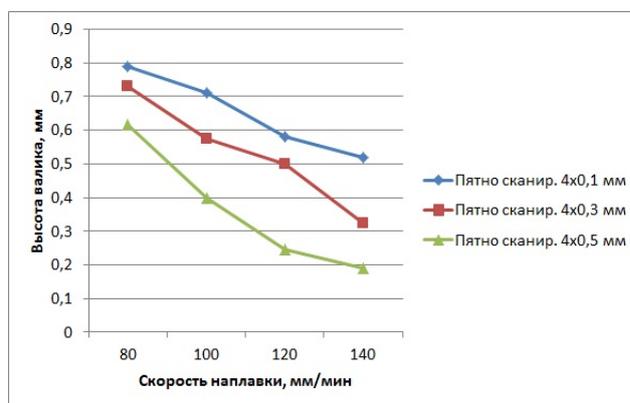


Рис. 2. Зависимости высоты валиков наплавки от скорости наплавки

Высота валиков наплавки с увеличением скорости наплавки также уменьшается (рис. 2). Этому способствует сочетание двух факторов: во-первых уменьшение энергозатрат в наплавляемый валик, что приводит к тому, что не весь поступающий порошок расплавляется и попадает в валик; во-вторых то, что одно и то же количество подаваемого порошка распределяется на большей длине валика. Из-за действия сразу двух факторов уменьшение высоты валиков происходит более интенсивно, чем их ширины (рис. 1 и 2).

Увеличение площади пятна сканирования (пятна сканирования) вызывает уменьшение ширины валиков наплавки (рис. 3). В этом случае при увеличении площади распределения энергии лазерного луча и уменьшении удельной энергии происходит уменьшение размера ванны расплава на поверхности подложки и, соответственно, уменьшение ширины валика.

Высота валиков наплавки также уменьшается при увеличении площади пятна сканирования (рис. 4). В этом случае также сказывается уменьшение удельной энергии, поступающей в валик, что не позволяет всему подаваемому порошку образовывать валик.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что режимы лазерной наплавки с поперечным сканированием оказывают существенное

влияние на формирование размеров валиков наплавки, что необходимо учитывать при назначении технологических режимов лазерной наплавки.

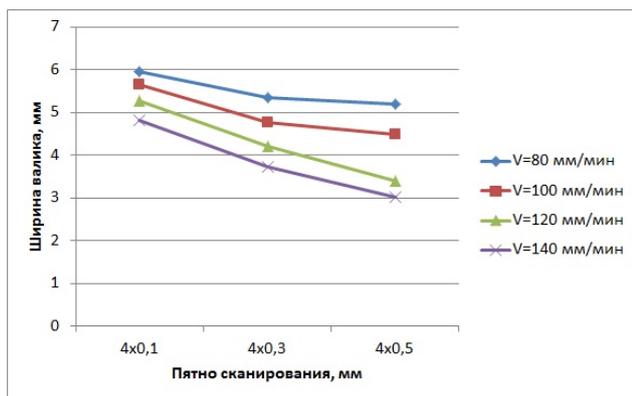


Рис. 3. Зависимости ширины валиков наплавки от площади пятна сканирования

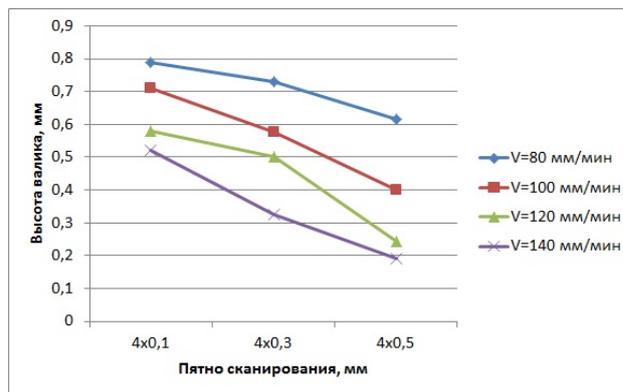


Рис. 4. Зависимости высоты валиков наплавки от площади пятна сканирования

1. Naghiyan Fesharki, M. Microstructure investigation of Inconel 625 coating, obtained by laser cladding and TIG cladding methods [Электронный ресурс]/ M. Naghiyan Fesharki, R. Shoja-Razavi, H.A. Mansouri, H. Jamali// Surface & Coating Technology. – 2018. – V. 353. – P. 25-31. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.08.061>.
2. Hoadley, A.F.A. A thermal model of laser cladding by powder injection/ A.F.A. Hoadley, M. Rappaz// Metallurgical and Materials Transactions. – 1992. – V. B23. – P. 631-642.

УДК 621.9.06

## ПОВЫШЕНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ 5-ОСЕВОГО СТАНКА С ЧПУ

Довнар С.С., Колесников Л.А., Яцкевич О.К., Авсиевич А.М.,  
Шашко А.Е.

Белорусский национальный технический университет, Минск  
Республика Беларусь

Для выявления путей повышения статической жесткости 5-осевого станка с ЧПУ ОАО «СтанкоГомель» (рисунок 1) проводилось МКЭ-моделирование его несущей системы (НС). Сравнивались варианты классического пустотелого чугунного (**ПЧ**; рис.1, а) исполнения структурных деталей (СД), чугунно-бетонного исполнения (**ЧБ**; рис.1, б; бетон заполняет полости в чугунных отливках) и полностью бетонного решения (**ПБ**; рис.3, а). Последний вариант, становящийся все более распространенным в машиностроении, предполагает замену чугунных отливок бетонными блоками. Под бетоном будем понимать

адаптированные для станкостроения марки полимербетона и высокопрочного бетона типа УНРС.

Рассматриваемый станок является компактной машиной со станиной и базирующемся на ней порталом, образованном двумя вертикальными стенками и траверсой. На траверсе расположены суппорт и ползун со шпиндельным узлом (ШУ). Обрабатываемая деталь находится на глобусном столе, удерживаемом стенками.

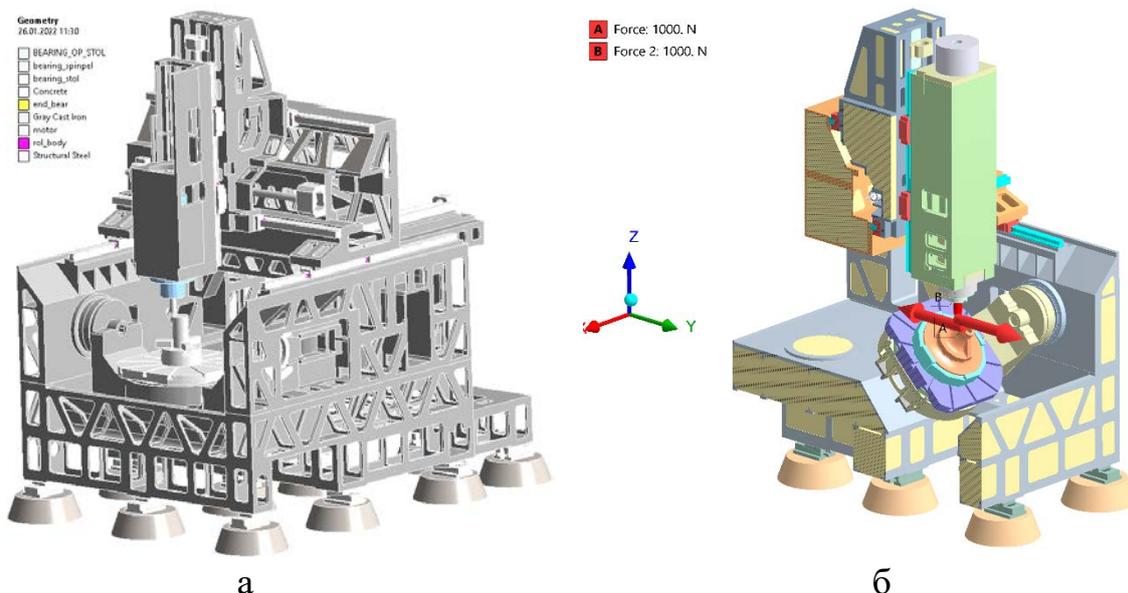


Рисунок 1 – Пустотелая чугунная (а; **ПЧ**) и чугунно-бетонная (**ЧБ**) несущие системы станка под действием пары сил в 1 кН (б)

Структурные детали характеризуются большим числом полостей и слабо развитыми треугольными связями в системе оребрения. Несущая система легковесна. СД имеют малую толщину стенок. Важно выяснить, насколько применение бетона компенсирует перечисленные проблемы.

Характеристики обобщенного бетона были приняты равными: плотность  $\rho_b=2300$  кг/м<sup>3</sup>; модуль упругости  $E_b=3 \times 10^4$  МПа; коэффициент Пуассона  $\mu_b=0.18$ . Механические свойства чугуна:  $\rho_{ch}=7200$  кг/м<sup>3</sup>;  $E_{ch}=1.3 \times 10^5$  МПа;  $\mu_{ch}=0.28$ ). Несущая система станка для структурных вариантов **ПЧ**, **ЧБ** и **ПБ** имела массу соответственно 6361, 11211, и 9443 кг. В последних двух случаях весь самого бетона в НС был равен 4850 и 7010 кг. Масса чугунных структурных деталей для вариантов **ПЧ**, **ЧБ** составила 3954 кг. Следовательно, чугун и бетон в станке соотносятся по массе как 1:1,22.

Станина опиралась на 11 усеченных бетонных конусов, моделирующих фундамент станка. Тестовое нагружение станка компонентами силы резания осуществлялось статически по осям X, Y, Z двумя противоположными силами по 1 кН. Одна сила прилагалась к детали на глобусном столе, а вторая – к инструменту в шпиндельном узле ползуна (схема для Y – на рис.1, б). В масштабах станка силы уравнивали друг друга.

Для виртуальных испытаний был разработан комплект сеток конечных элементов, в том числе регулярных с 1,6 млн узлов. Элементы имели квадратичную аппроксимацию перемещений.

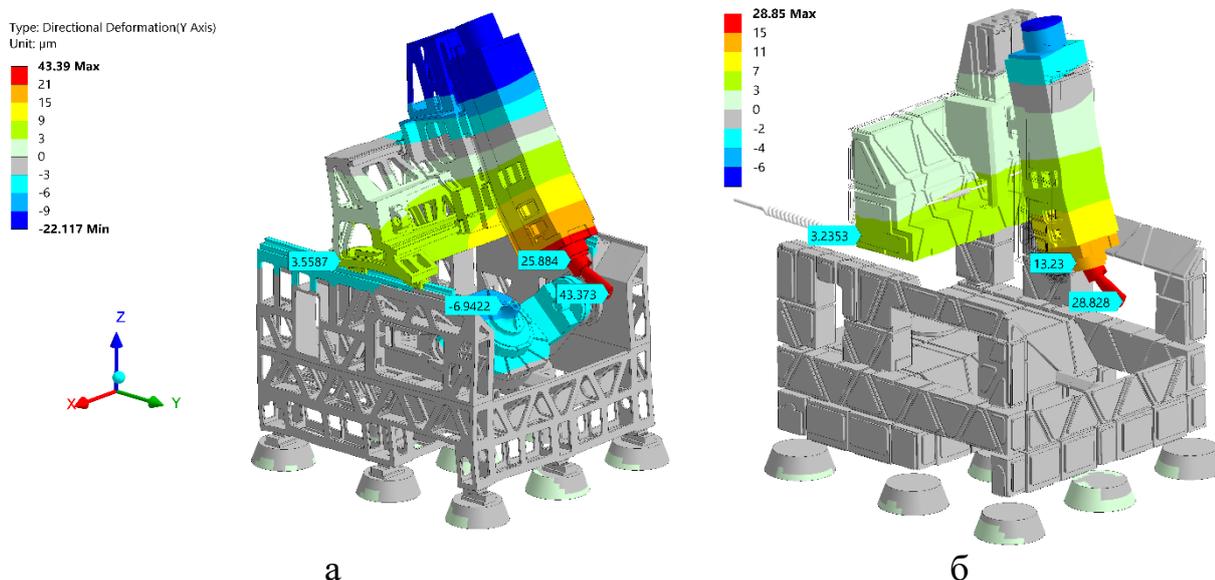


Рисунок 2 – Деформационные перемещения по оси Y (мкм;  $\times 20000$ ) для несущих систем станка: а - пустотелой (ПЧ); б - бетонированной (ЧБ; чугунные и стальные детали – кроме ползуна - скрыты)

Деформационные перемещения по Y сопоставлены для вариантов ПЧ и ЧБ на рис.2. Для пустотелой НС (рис.2, а) перемещение глобусного стола (-6,9422 мкм) гораздо меньше (в 3,72 раза), чем ШУ (25,884 мкм). Таким образом, станок нуждается в повышении жесткости именно на инструменте, а не на детали. Глобусный стол имеет небольшую податливость. Ползун же существенно изгибается и закручивается на траверсе.

Заполнение полостей бетоном уменьшает перемещение торца ШУ с 25,884 мкм (а) до 13,23 мкм (б). Следовательно, статическая жесткость возрастает в 1,95 раза. Она поднимается с 38,6 до 75,5 Н/мкм. На режущей кромке из-за большой податливости инструмента рост общей жесткости меньше (в 1,504 раза; маркеры 43,373 и 28,828 мкм).

Бетонирование по варианту ЧБ увеличивает и жесткость глобусного стола тоже. Его деформационное перемещение падает до -4.4772 мкм (в 1,55 раза по сравнению с ПЧ).

Бетонирование по варианту ПБ (рис.3) также эффективно для повышения жесткости ШУ и инструмента. Маркер 16,828 мкм на рис.3, а указывает на возрастание жесткости ШУ в 1,53 раза в сравнении с рис.2, а.

Полностью бетонное решение ПБ уступает в смысле статической жесткости смешанному чугунно-бетонному решению ЧБ в 1,27 раза.

Итак, бетонирование полостей чугунных деталей (ЧБ) увеличивает статическую жесткость станка примерно вдвое. Этот структурный вариант следует рекомендовать, когда станку предстоит выполнять черновое резание в

квазистатических условиях или когда чугунная НС уже существует и её надо усилить в рамках реновации станка.

Бетон не является полной заменой чугуна в смысле статической жесткости. Поэтому НС из бетонных плит несколько уступает чугунно-бетонному решению. Однако, исполнение станка с бетонной несущей системой **ПБ** рационально, если переменное резание происходит вблизи резонансов станка и требуется обеспечивать динамическую жесткость путем интенсивного демпфирования колебаний.

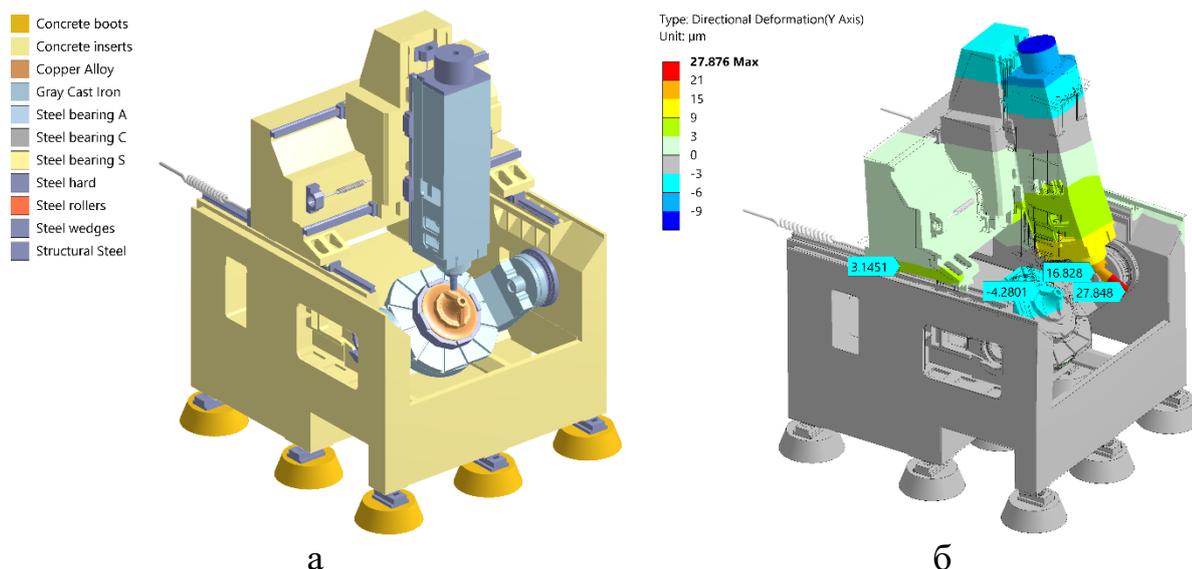


Рисунок 3 – Станок с полностью бетонной (**ПБ**) несущей системой (а) и его деформационные перемещения по оси Y (мкм) (б;  $\times 20000$ )

УДК 621.9.06

## МКЭ-АНАЛИЗ БИОНИЧЕСКОГО УСИЛЕНИЯ КОЛОНН СТАНКОВ

Довнар С.С., Лапука А.Д.

Белорусский национальный технический университет, Минск  
Республика Беларусь

Несущие системы (НС) современных крупногабаритных станков часто включают в себя колонны (стойки), традиционно создаваемые как монолитные чугунные отливки. Их будем называть стандартными колоннами (SC). Часто такие детали имеют невысокую жесткость, особенно для станков типа “*Travelling column*”, где колонна подвижна и динамически нагружена силами резания.

Жесткость колонны SC требуется повысить в ходе реновации станка. Известным решением является заполнение колонны бетоном. Это дает ограниченный эффект. Под бетоном понимается полимербетон или высокопрочный бетон типа УНРС. В данной работе предлагается делать

бионическое усиление (БУ) колонны снаружи (рис.1), создавая на её стенках бионический бандаж (BB). Бандаж формируется из бетона (заливка, 3D-принтинг) и копирует форму *ствола дерева*. Бетон бандажа BB и чугун колонны SC должны сцепиться (рис.1, а) и дать жесткое решение в духе классической концепции *равнопрочной балки*.

Эффективность решения оценивалась путем МКЭ-анализа. Цель усиления – повысить статическую и динамическую жесткость на шпинделе  $Sp$ , особенно в направлении X (кручение колонны). На рис. 1, б показана тестирующая сила ( $F_x = 1\text{кН}$  - маркер D), а также граничные условия (A, B), имитирующие гидростатические направляющие (C – образ привода по X).

Масса бионического бандажа BB составляет 10,48 т, что менее трети от совокупной массы колонны SC (9,21 т), салазок (10,94 т) и суппорта (4,93 т).

На рис. 1, в показан совместно *наружный* бандаж BB и бетонное ядро Core, которое может быть создано *внутри* колонны. Ядро Core имеет в модели массу 2624 кг, сечение  $0,93 \times 0,87$  м и внутреннее отверстие  $\varnothing 0,75$  м.

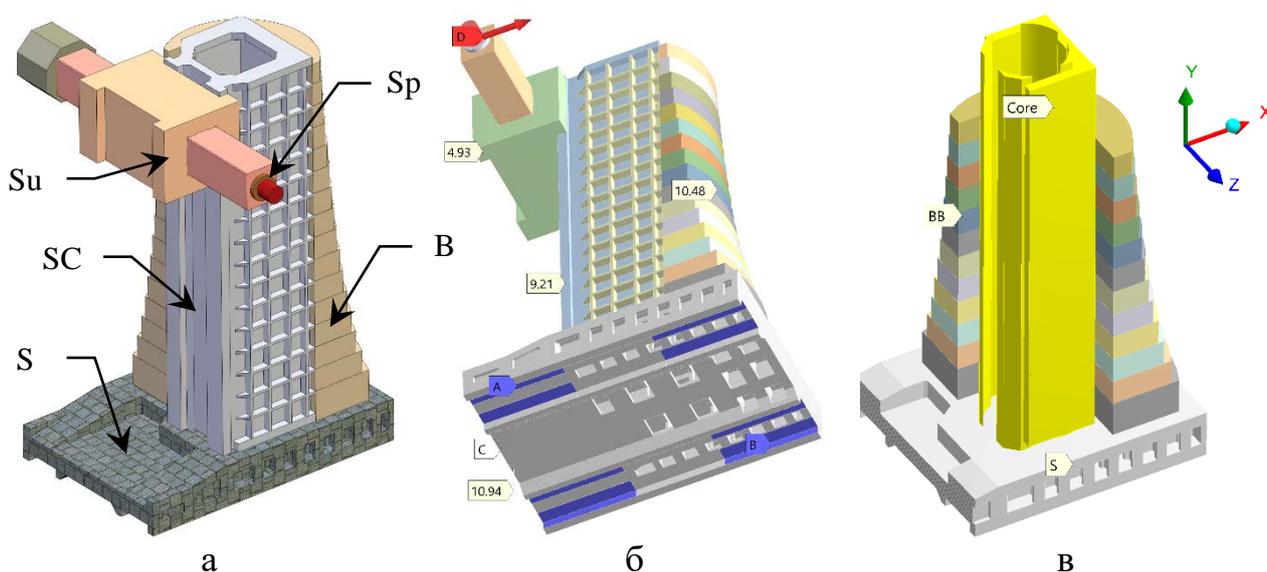


Рисунок 1 – Подвижная колонна: а – 3D-модель из салазок S, колонны SC (4,5 м высоты), бандажа BB, суппорта Su с ползуном и шпиндельным узлом Sp; б - массы (т) и условия для МКЭ; в – бетонные бандаж BB и ядро Core

На рис. 2 представлены результаты статического линейного МКЭ-анализа. Собственно чугунная колонна SC подвергается кручению и изгибу силой  $F_x = 1\text{кН}$ . Шпиндельный узел отклоняется на 22,588 мкм (рис. 2, а). Это соответствует невысокой жесткости  $j_x^{SC} = 44,2\text{Н/мкм}$ . Виртуальное введение бетонного ядра Core (рис. 2, б) снижает отклонение до 17,032 мкм. Жесткость возрастает в 1,32 раза. Однако, самой эффективной мерой оказывается бионическое усиление БУ (рис. 2, в). Отклонение (9,3468 мкм) падает в 2,41 раза, а жесткость достигает 106,8 Н/мкм.

Бионический бандаж вполне эффективен и без создания ядра *Core* (ядро сложно формировать внутри колонны). Вариант *BB* (разумеется, *BB* сцеплено с *SC*) дает жесткость  $j_x^{BB} = 95,4 \text{ Н/мкм}$ , что вдвое больше, чем исходно.

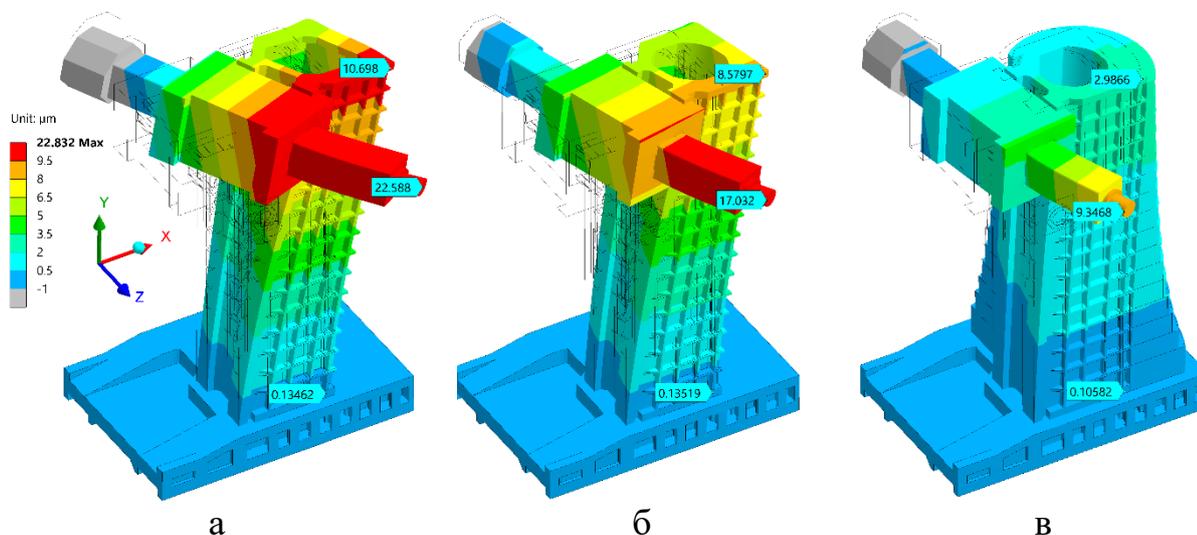


Рисунок 2 – Статическая деформация станка под действием силы  $F_x = 1 \text{ кН}$  на шпинделе: а – стандартная колонна *SC*; б – колонна с бетонным ядром (*SC+Core*); в – колонна с ядром и бионическим бандажом *BB* ( $\times 75000$ )

Для оценки динамического усиления колонны были проведены модальный и гармонический анализы. Три нижние (главные) резонансные моды оказались независимыми по форме от структурного варианта колонны (рис. 3). Первая и вторая моды (*Mb1* и *Mb2*) заключаются в изгибных колебаниях колонны. Третья мода *Mt3* создается крутильными колебаниями колонны с ползуном вокруг вертикальной оси, близкой к оси колонны.

Для случая *SC* резонансные частоты составляют триаду «14.7, 17.8 и 35.2 Гц». Бионическое усиление *BB* повышает частоты до «26.3, 30.2 и 52.8 Гц».

Повышение резонансных частот способствует демпфированию вибраций станка и расширению его квазистатического частотного диапазона.

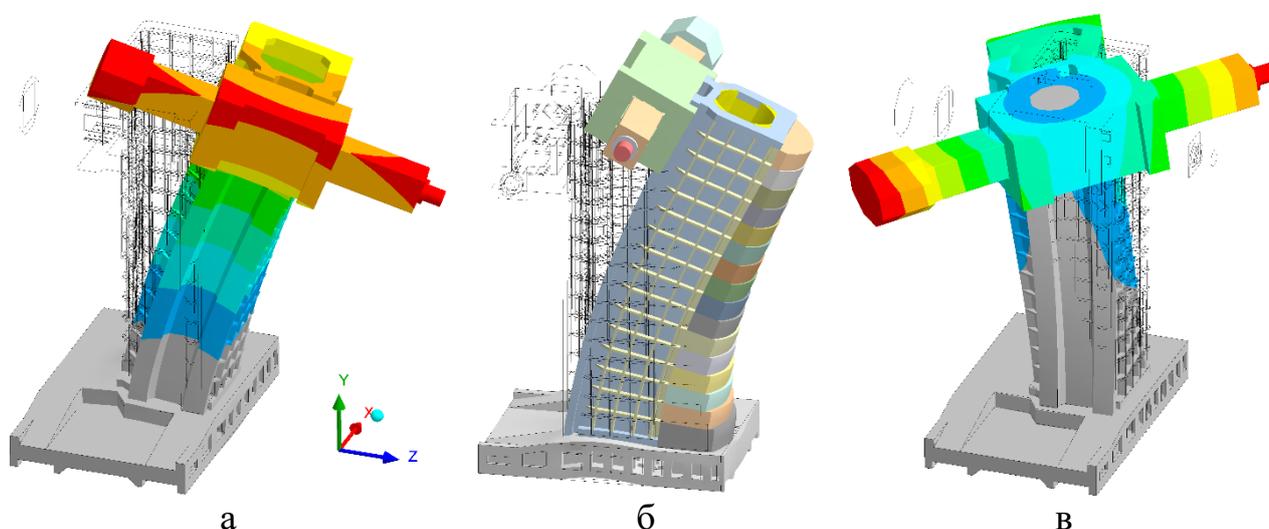


Рисунок 3 – Три нижние резонансные моды: а – изгибная  $Mb1$  (вдоль  $Z$ ); б – изгибная  $Mb2$  (вдоль  $X$ ); в – крутильная  $Mt3$  (вокруг  $Y$ )

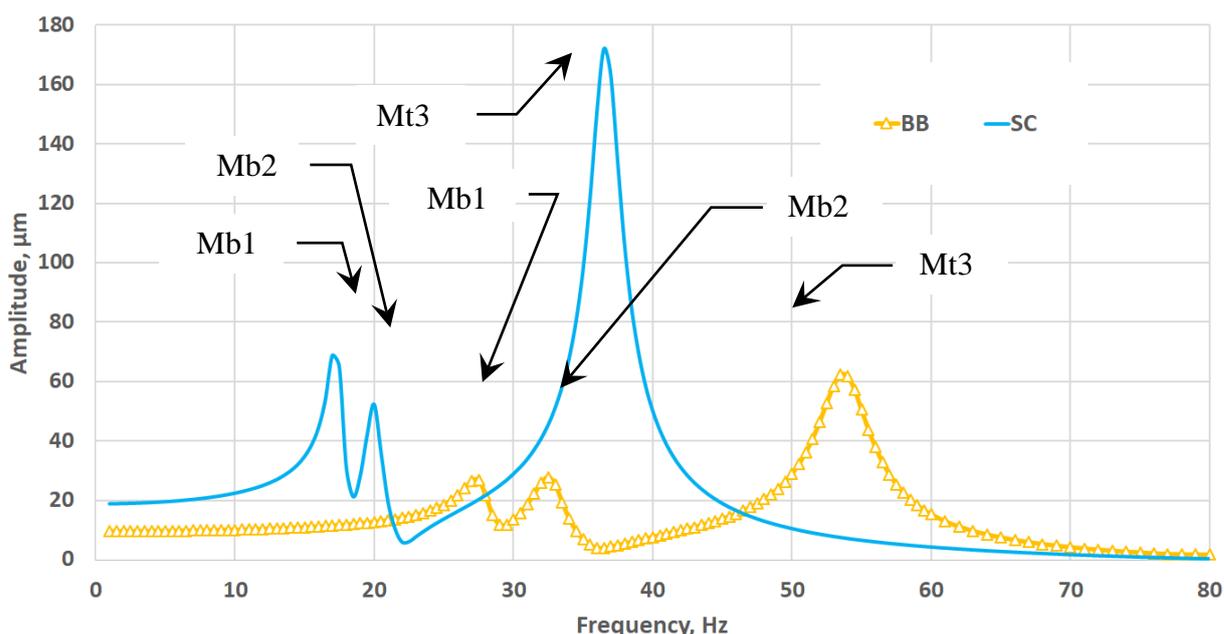


Рисунок 4 – АЧХ «сила  $F_x$  – перемещение  $u_x$ » для стандартной колонны  $SC$  и колонны с бионическим бандажом  $BB$

Таким образом, бионическое усиление колонн станков представляется действенным решением. Жесткость на шпинделе может быть повышена не менее, чем вдвое. Резонансные пики ослабляются в 2 – 3 раза. Бионическое усиление колонны является экономичным по материалоемкости. В первую очередь его следует рекомендовать для реновации крупных станков.

УДК 621.77

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ДИСЛОКАЦИЙ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПОКОВОК, ПОЛУЧЕННЫХ ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКОЙ

Дубенец С.С.<sup>1,2</sup>

- 1) Белорусский национальный технический университет;
- 2) Физико-технический институт НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь

Наряду с исследованиями параметров процессов пластической деформации при поперечно-клиновой прокатке (определение напряжённо-деформированного состояния, скорости распространения деформации, изменения температуры) одним из актуальных вопросов является определения плотности дислокаций (линейных искажений) в исследуемом объёме материала [1]. Актуальность данного вопроса обусловлена необходимостью разработки и применения эффективных методов горячего пластического деформирования деталей, обеспечивающих надлежащую прочность деталей [2].

Изменение плотности дислокаций влияет на прочность обрабатываемого материала. Зависимость прочности металла от плотности дислокаций [3] представлена на рисунке 1. При поперечно-клиновой прокатке деформируемый металл подвергается циклическому нагружению, что способствует образованию осевого разрушения (рисунок 2) и накоплению дислокаций.



Рисунок 1 – Зависимость прочности материала от плотности дислокаций [3]

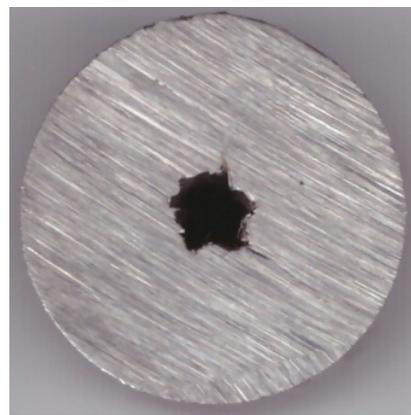


Рисунок 2 – Осевое разрушение при поперечно-клиновой прокатке

Для определения плотности дислокаций применяется способ дифракции рентгеновских лучей, для которых просвечиваемый объём исследуемого материала является дифракционной решёткой. Рентгеновская трубка является источником монохроматического излучения.

Количественно дислокации оцениваются суммарной длиной всех дислокаций в  $1 \text{ см}^3$  металла. Эта величина называется плотность дислокаций. Плотность дислокаций также может быть использована как параметр, отражающий повреждаемость материала, при условии учета ряда особенностей. Рост плотности дислокаций происходит вследствие накопления деформаций, а также в силу термообработки. Оба эти фактора изменяют пластические свойства металла. Рассмотрим два случая: деформация происходит при постоянной комнатной температуре и при изменении температуры. В первом случае изменение плотности дислокаций происходит исключительно за счет накопления деформации. Построив тарировочную зависимость повреждаемости материала от плотности дислокаций (последняя нелинейно

связана с накопленными деформациями) можно по результатам экспериментального определения плотности дислокаций прогнозировать повреждаемость материала, другими словами прогнозировать ресурс пластичности.

Установлено [4], что скорость увеличения плотности дислокаций тем выше, чем выше среднее напряжение в очаге деформации (растягивающие напряжения – положительны) и чем ниже значение предельной степени деформации сдвига. Этот фактор должен учитываться при построении тарировочных зависимостей повреждаемости от плотности дислокаций. Известно, что деформации в различных зернах металла при пластическом формоизменении имеют значительный разброс значений. Отсюда вытекает требования к экспериментальному определению плотности дислокаций: она должна определяться как среднее значение по множеству зерен.

1. Militzer, M. Microstructure Model for Hot Strip Rolling of HSLA Steels / Militzer M., Howbolt E.B., Meadowcroft T.R. // Metall. Mater. Trans. A. – 2000. – Vol. 32A. – P. 1247–1259.
2. Дудников, А. А. К вопросу влияния пластического деформирования на прочность деталей [Текст]: 5/7, 2011. – (Вост.-Европ. журн. передовых технологий) // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. – С. 41-43.
3. Юркевич, Н. П. Дислокации и их влияние на механические свойства твердых тел / Н. П. Юркевич, С. И. Петренко. – Минск: БНТУ, 2011. – 19 с.
4. Кожевникова, Г.В. Пластические свойства металлов и сплавов: феноменологическая деформационная теория разрушения при пластическом течении / Г.В. Кожевникова, В.Я. Щукин. – Минск: Беларус. навука, 2021. – 277 с.

**УДК 621.762.4**

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА СТЕРЖНЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Дудяк А.И., Дикан Ж.Г., Мелеховец П.А., Сахнович А.Д.**  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Типичным примером стержней из композиционных материалов являются стержни из биметаллических пар, составленных из материала с разными

значениями модулей Юнга, и работающих на изгиб как консольные или двух опорные балки. В качестве примера можно представить железобетонные балки, широко используемые в строительстве различных сооружений.

Рассмотрим случай чистого изгиба балки прямоугольного поперечного сечения, составленной из двух неоднородных материалов, обладающих различными модулями продольной упругости, т.е.  $E_1 > E_2$ , при равных площадях сечений  $A_1 = A_2$  (рис. 1).

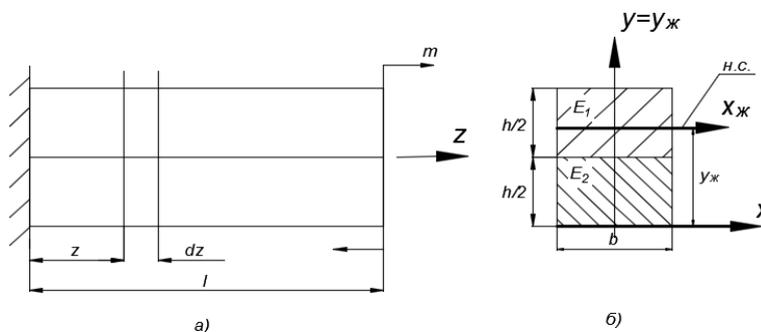


Рис. 1. а) схема нагружения; б) форма сечения балки

В результате деформации верхние слои участка будут растянуты, а нижние сжаты, а правое сечение балки этого участка повернется относительно левого сечения на угол  $d\theta$  (рис. 2).

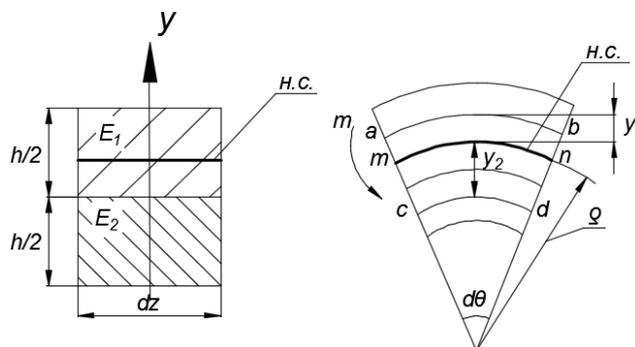


Рис. 2. Деформированное состояние участка балки длиной dz.

Из закона Гука следует:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Таким образом получим:

$$\sigma_1 = E_1 \cdot \frac{y_1}{\rho}; \sigma_2 = E_2 \cdot \frac{y_2}{\rho} \quad (2)$$

Из уравнения статики следует что сумма внешних изгибающих моментов должна уравновешиваться за счет возникновения внутренних изгибающих моментов.

$$\sum F(x) = 0$$

$$M_u - \int_{A_1} \sigma_1 \cdot y_1 \cdot dA_1 - \int_{A_2} \sigma_2 \cdot y_2 \cdot dA_2 = 0 \quad (3)$$

Подставив значения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  из выражения (2) в выражение (3) получим:

$$M_u = \frac{E_1}{\rho} \int_{A_1} y_1^2 \cdot dA_1 + \frac{E_2}{\rho} \int_{A_2} y_2^2 \cdot dA_2 \quad (4)$$

Из последнего уравнения следует:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M_u}{(E \cdot I_x)_{np}} \quad (5)$$

Подставим выражение (5) в выражения (2) для определения напряжений в сечении неоднородного стержня окончательно получим:

$$\sigma_1 = \frac{M_u \cdot E_1}{(E \cdot I_x)_{np}} \cdot y_1 \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \frac{M_u \cdot E_2}{(E \cdot I_x)_{np}} \cdot y_2 \quad (7)$$

Формулы (6) и (7) позволяют определить напряжения в сечениях балок переменной жесткости.

В случае, когда композиционный материал состоит из «n» числа разнородных материалов, формула для определения нормальных напряжений будет иметь вид:

$$\sigma_i = \frac{M_u \cdot E_i}{(E \cdot I_x)_{np}} \cdot y_i \quad (8)$$

Приведенная методика позволяет определять изменение нормальных напряжений в стержневых конструкциях, составленных из материалов с различными физико-механическими свойствами и жестко соединенных между собой по длине. Подобная методика приводится для стержней из композиционных материалов.

1. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев. –10-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 1999 – С. 103-122.
2. Подскребко, М.Д. Сопротивление материалов: учебник / М.Д. Подскребко. – Минск: Вышш. шк., 2007 – С. 203-238.
3. Старовойтов, Э.И. Сопротивление материалов: учебное пособие для студентов технических вузов / Э.И. Старовойтов. – Гомель: БелГУТ, 1999 – С. 49-55.

**УДК 539.3**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КРУЧЕНИИ СТЕРЖНЯ ИЗ ДВУХ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Дудяк А.И., Хвасько В.М., Дикан Ж.Г.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

В классическом курсе сопротивления материалов кручение рассматривается как такой вид деформации стержня, при котором в его

поперечных сечениях возникают только крутящие моменты, а все остальные внутренние силовые факторы (изгибающие моменты, поперечные и продольные силы) равны нулю [1]. При этом рассматриваются только стержни круглого поперечного сечения, которые называются валами [2].

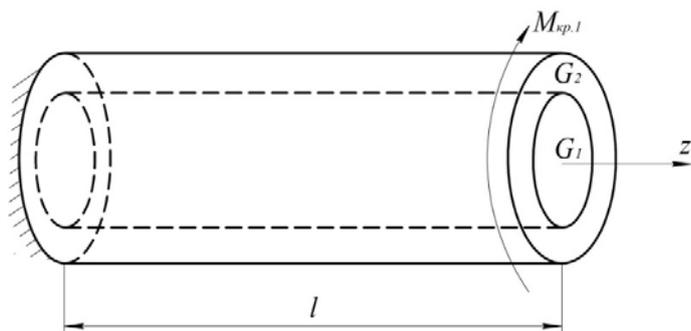


Рис. 1. Цилиндрический стержень, выполненный из двух разнородных материалов, под действием крутящего момента  $M_{кр.1}$

Рассмотрим стержень длиной  $l$ , составленный из двух разнородных материалов и прочно соединенных друг с другом. Центральный стержень выполнен в виде сплошного цилиндра и изготовлен из материала с модулем сдвига  $G_1$ . Наружный стержень изготовлен в виде полого цилиндра из материала с модулем сдвига  $G_2$ . В дальнейшем условимся, что

$G_1 > G_2$  (рис. 1). В этом случае оба стержня при кручении будут работать как единое целое.

Нагрузим стержень с торца крутящим моментом  $M_{кр.1}$ . Тогда в поперечных сечениях стержня возникает внутренний крутящий момент  $m_z$ , представляющий собой сумму моментов, действующих в каждом его слое:

$$m_z = (G_1 I_{\rho 1} + G_2 I_{\rho 2}) \frac{d\varphi}{dz}, \quad (1)$$

или

$$m_z = (GI_{\rho})_{np} \cdot \frac{d\varphi}{dz}, \quad (2)$$

где  $(GI_{\rho})_{np} = G_1 I_{\rho 1} + G_2 I_{\rho 2}$  - приведенная жесткость поперечного сечения вала;

$I_{\rho 1}$  и  $I_{\rho 2}$  - полярные моменты инерции отдельных частей вала;

$d\varphi$  - элементарный угол закручивания вала;

$dz$  - элементарная длина сечения вала.

С учетом выражения (2) получим формулы для определения касательных напряжений в отдельных частях сечения вала:

$$\tau_1 = \frac{m_z G_1}{(GI_{\rho})_{np}} \cdot \rho_1, \quad \tau_2 = \frac{m_z G_2}{(GI_{\rho})_{np}} \cdot \rho_2. \quad (3)$$

Если вал состоит из нескольких отдельных частей разнородных материалов, то выражение для определения касательных напряжений в любом слое стержня можно выразить в виде формулы:

$$\tau_i = \frac{m_z G_i}{(GI_{\rho})_{np}} \cdot \rho_i, \quad (4)$$

где  $G_i$  - модуль сдвига материала слоя, в котором определяют величину касательных напряжений;

$\rho_i$  – радиус кривизны слоя материала с модулем сдвига  $G_i$ .

Условием статической прочности вала следует считать такое условие, когда максимальные касательные напряжения не превосходят допусковых напряжений для любого материала слоя [2].

Согласно формулам (3) на рис. 2б приведено распределение касательных напряжений по сечению вала. При этом касательные напряжения по высоте сечения изменяются по линейному закону и в зоне сопряжения разнородных материалов эпюра напряжений терпит разрыв.

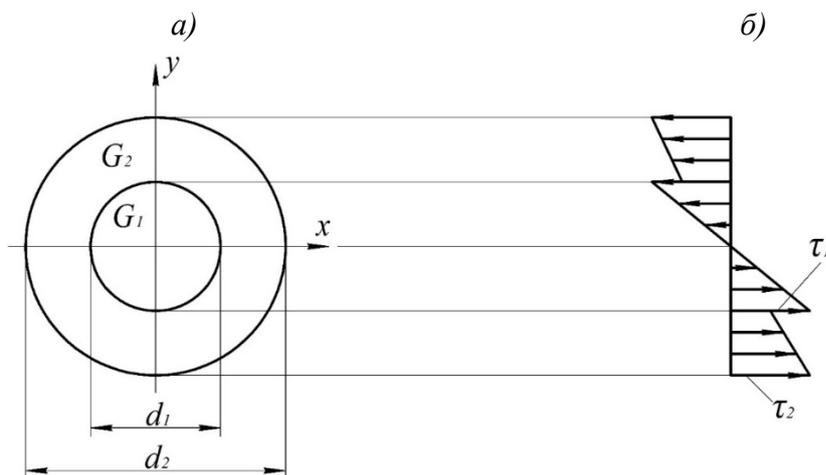


Рис. 2. а) Поперечное сечение вала, состоящее из двух разнородных материалов:  $d_1$  – диаметр сплошного цилиндра;  $d_2$  – наружный диаметр полого цилиндра; б) Эпюра распределения касательных напряжений по высоте сечения

1. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев. –10-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 1999. – С. 103-122.
2. Подскребко, М.Д. Сопротивление материалов: учебник / М.Д. Подскребко. – Минск: Высш. шк., 2007. – С. 203-238.
3. Старовойтов, Э.И. Сопротивление материалов: учебное пособие для студентов технических вузов / Э.И. Старовойтов. – Гомель: БелГУТ, 1999. – С. 49-55.

УДК 621.762.8

## ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АНТИФРИКАЦИОННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВЫХ ИНФИЛЬТРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

Зверко А.А.<sup>1</sup>, Дьячкова Л.Н.<sup>2</sup>, Шелег В.К.<sup>1</sup>

1) Белорусский национальный технический университет

2) Институт порошковой металлургии имени академика О.В.Романа  
Минск, Республика Беларусь

Антифрикционные материалы нового поколения для тяжело нагруженных режимов работы, согласно данным теории трибоматериаловедения, должны иметь гетерогенную структуру и, согласно основному принципу конструирования антифрикционных материалов, состоять из компонентов, существенно различающихся по твердости. Такому строению в большей степени отвечают псевдосплавы, представляющие собой материалы, состоящие из компонентов, слабо или не взаимодействующих между собой, физические и механические свойства которых могут различаться на несколько порядков. Псевдосплавы получают преимущественно методами порошковой металлургии, возможности которой позволяют в широких пределах варьировать состав и соотношение компонентов, и соответственно получать требуемый комплекс физико-механических свойств и эксплуатационных параметров.

Наиболее применяемыми псевдосплавами являются материалы системы железо – медь. Псевдосплавы системы железо – медь, полученные прессованием и спеканием, обладают хорошими триботехническими свойствами, но, из-за высокой остаточной пористости и низкой прочности, их нельзя использовать в тяжело нагруженных узлах трения. Перспективным процессом получения высокоплотных псевдосплавов системы железо - медь является инфильтрация каркаса на основе железа, полученного методом порошковой металлургии, медью или медными сплавами [1]. Особенности строения железо – медных псевдосплавов оказывают влияние на механизм их изнашивания при трении. Кроме всего прочего на процессы, происходящие в зоне трения, а следовательно, эксплуатационные свойства изделий, влияет качество изнашиваемой поверхности, т.е. условия механической обработки образцов. Выбор рациональных условий обработки позволяет ускорить формирование оптимальной равновесной шероховатости трущейся поверхности и увеличить долговечность узлов трения.

Исследование влияния качества поверхности изделия на триботехнические свойства псевдосплава осуществляли на машине трения Т-05 с парой трения ролик – колодка. Поверхности трения обрабатывали на плоскошлифовальном станке абразивным кругом. В качестве СОЖ использовалась 4%-ная эмульсия на основе концентрата «Emulgol ES». Контртело изготавливалось из стали 40Х, закаленной до твердости 40-45 HRC. Условия шлифования принимались согласно дробному факторному плану (таблица).

Скорость шлифования составляла 35 м/с. Шлифование осуществлялось без выхаживания, а также при двух и четырех проходах выхаживания. Нормальная сила на стыке ролик – колодка принималась равной 600 Н, частота вращения ролика  $n = 180$  об/мин (линейная скорость  $v = 0,33$  м/с).

Таблица – Условия шлифования рабочих поверхностей колодок

Номер опыта	Глубина шлифования $t$ , мм	Скорость движения стола $S_{пр}$ , м/мин	Поперечная подача $S_{поп}$ , мм/2 х.
-------------	--------------------------------	---	--

1	0,005	4	0,6
2	0,045	15	0,6
3	0,045	4	5
4	0,005	15	5

Анализ закономерностей формирования шлифованной поверхности образцов из псевдосплавов показал, что их состав незначительно влияет на шероховатость обработанной поверхности, для всех исследованных материалов параметр  $Ra$  находился в пределах 0,2-0,3 мкм. Правильный выбор режима шлифования может снизить шероховатость на 25 %. Установлено, что для изделий из псевдосплавов, независимо от режима шлифования, два прохода выхаживания микрорельеф почти не изменяют, а после четырех проходов имеет место значительное снижение высоты микронеровностей. Непосредственно после шлифования на поверхности наблюдаются волнистость, глубокие риски, следы бокового течения металла под действием единичных абразивных зерен и другие дефекты, которые после выхаживания значительно уменьшаются.

Установлено, что температура на поверхности трения образцов из псевдосплавов на 5–10 % ниже, чем из компактной бронзы БрО5Ц5С5 благодаря их большей износостойкости и высокой теплопроводности. Исследование относительного объемного изнашивания образцов в зависимости от состава материала и условий обработки показало, что выхаживание снижает износ у всех исследованных материалов в разной степени. В псевдосплавах, полученных инфильтрацией каркаса из стали ПК80, независимо от исходной плотности каркаса, выхаживание уменьшает износ практически в 2 раза, из стали ПК80 с добавкой 0,5 % дисульфида молибдена – на 10 %, псевдосплава, полученного жидкофазным спеканием – в 1,5 раза. Минимальный износ, как с выхаживанием, так и без него, наблюдается у псевдосплава, полученного инфильтрацией каркаса из стали ПК80 с добавкой дисульфида молибдена.

1. Мамаев, Н.М. Антифрикционные материалы и композиции. Механизм трения // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2009. – №10. – С. 68-74.

УДК 621.793.18

## **АНАЛИЗ КИНЕТИЧЕСКИХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ В ВАКУУМЕ**

**Иванов И.А.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Важным этапом, который определяет технологические возможности вакуумного электродугового метода нанесения покрытий, является генерация плазменного потока. В силу этого факта, большинство разработчиков и исследователей значительное внимание уделяют правильному выбору электродугового испарителя [1]. В качестве критериев выбора рассматриваются параметры, которые характеризуют не только технологическую эффективность испарительного устройства, но и эффективность физических процессов, протекающих на поверхности эродирующего электрода (средний заряд ионов, плотность ионного тока, начальная энергия ионов, степень ионизации потока). Данный подход является оправданным, так как энергия ионов конденсирующегося потока в значительной степени определяет свойства формируемых покрытий. Однако беглый анализ структурно-функциональной схемы и параметров технологических этапов процесса вакуумного электродугового нанесения функциональных покрытий показывает, что технологическая среда должна играть значительную роль в процессе формирования покрытий заданного состава и свойств. Это связано как с процессами на этапе массопереноса заряженных частиц от поверхности катода до поверхности конденсации, так и с явлением физической сорбции на поверхности упрочняемой заготовки.

Взаимодействие ионов потока и частиц технологического газа с образованием продуктов реакции связано с преодолением потенциального барьера, который определяется законом Аррениуса и зависит от величины энергии активации химической реакции. Для представления полной картины о протекающих в заданном объеме или на выбранном участке поверхности химических реакций необходимо построение кинетических кривых образования продуктов реакции или расходования продуктов реакции. Однако построение такой кривой для случая анализа процессов плазмохимического синтеза высоко ионизированных плазменных потоков на поверхности изделия крайне затруднительно. Выходом из данной ситуации является анализ свойств формируемых покрытий, которые зависят от степени протекания химических реакций на поверхности конденсации плазменного потока.

Экспериментально установлено, что в процессах столкновения ионов с частицами технологического газа в объеме вакуумной камеры не образуется химических соединений. Все образование соединений происходит на поверхности конденсации плазменного потока. Результаты рентгенофазового анализа вакуумно-плазменных покрытий различного состава показывают, что введение реакционно способного технологического газа в разрядный промежуток вызывает наблюдаемое уширение дифракционных максимумов на рентгенограммах покрытий при низких значениях ускоряющего потенциала подаваемого на подложку. Дифракционные максимумы становятся слабовыраженными, наблюдается их смещение от табличных значений и наложение друг на друга. Всё это существенно затрудняет рентгенофазовый анализ покрытий. Независимо от типа исследуемого реакционного газа (азот или кислород) существует критическая величина давления равная, приблизительно,  $1 \times 10^{-2}$  Па, ниже которого образование соединений элементов материала катода с молекулами реакционного газа не наблюдается.

Рост давления реакционного газа ведет к образованию соединений с участием его атомов, что связано с «лавинообразным» ростом выхода ионов, например,  $N_2^+$ . При этом происходит увеличение различия в соотношении компонентов в катоде и в покрытии. Например, для катодов из сплавов титан-кремний наблюдается уменьшение относительного количества кремния в покрытии. Предположительно это связано с ростом количества поглощенного растущим покрытием азота за счет роста ионизированных частиц – ионов  $N_2^+$ . Однако рост давления может приводить, также, к увеличению рассеяния ионов кремния на молекулах газа. Измерение микро твердости силицидных покрытий осаждаемых в среде реакционного газа показало, что она ведёт себя немонотонно, в отличие от микро твёрдости покрытий, получаемых осаждением однокомпонентных плазменных потоков в среде реакционного газа, у которых наблюдается «насыщение», достигаемое при определенном значении ускоряющего потенциала. При этом в начальной области, где изменения максимальны, фазовый состав покрытий приблизительно постоянен. Это говорит о том, что за счет одновременного протекания на поверхности конденсации нескольких химических реакций, количество растворенного и участвующего в образовании химических соединений газа может меняться в зависимости от условий осаждения.

Формирование вакуумно-плазменных покрытий относится к открытой системе протекания плазмохимических реакций. Изменение концентрации реагентов происходит не только за счет их реагирования друг с другом, но и в результате массопереноса реагентов (ионов - от плазменного источника, атомов технологического газа – в результате контролируемой подачи его в рабочий объём вакуумной камеры). Если для условий плазмохимического синтеза вакуумно-плазменных покрытий считать технологический объём вакуумной камеры реактором идеального смешивания (т.е, допустить, что процесс фазо- и структурообразования происходит в стационарном режиме) тогда изменение концентрации продукта реакции будет пропорционально объёмной скорости подачи реагента к поверхности конденсации и разности концентрации хотя бы одного из реагентов на граница плазма – поверхность покрытия.

1. Иванов И.А. Условия формирования плазмы дугового разряда в вакууме и ее использование для упрочнения поверхностей сталей и сплавов // Современные технологии для заготовительного производства: сб. научных работ респ. н.-технич. конф. Минск: БНТУ. – 2021. – с. 81.

УДК 621.78; 621.179.2

## **ЗАВИСИМОСТЬ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ОТ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ**

**Кане М.М., Крайко С.Э., Раманович А.А.**

Белорусский национальный технический университет

Вырубные штампы широко используются при изготовлении различных изделий машино- и приборостроения из листового материала. В общем

количестве штамповой оснастки доля вырубных и пробивных штампов составляет 70...90%. При этом на долю стальных штампов в различных отраслях промышленности (в отличие от твёрдосплавных) приходится 90...95%. Как показывают результаты выполненных ранее исследований [1, 2, 3, 4], современные методы упрочнения инструментальных сталей позволяют увеличить стойкость инструмента от 3 до 7 раз.

Существует много методов поверхностного упрочнения деталей машин. Преимуществами лазерного упрочнения являются отсутствие деформаций поверхности и необходимости её последующей обработки, минимальные расход энергии, стоимость процесса упрочнения и воздействие его на окружающую среду. Рабочие детали штампов (пуансоны и матрицы) подвергаются ударной нагрузке и износу. Поэтому к материалу пуансонов и матриц предъявляются требования высокой твёрдости и износостойкости поверхности при вязкости сердцевины.

Для изготовления рабочих частей штампов для холодной листовой штамповки применяют углеродистые инструментальные стали, высокохромистые стали с высокими значениями прокаливаемости и износостойкости и др. Для исследования выбрана Сталь X12M, которая имеет высокую твёрдость после закалки (58...60 HRC), большую износостойкость и широко используется для изготовления рабочих частей вырубных штампов [1].

Для выполнения исследования нами был выбран CO<sub>2</sub>-лазер «Комета 2» с мощностью излучения до 1000 Вт. Поскольку ширина рабочих поверхностей вырубных штампов составляет 10...200 мм, а диаметр лазерного луча обычно составляет 2...5 мм, было принято решение производить лазерное упрочнение строчками с коэффициентом перекрытия  $K_{пер}$ . Так как шлифованные металлические поверхности отражают до 90% лазерного излучения в исследовании для увеличения светопоглощения на поверхности образцов наносился слой краски различной толщины ( $t=5...15$  мкм) с наполнителем из оксидов металлов. Толщина покрытия измерялась прибором В7-517.

Для повышения эффективности экспериментального исследования влияния условий лазерного термообработки стали X12M (изучалось влияние  $q$ ,  $t$  и  $K_{пер}$ ) на параметр  $R_a$  упрочнённой поверхности нами была использована методика полного факторного эксперимента. По результатам экспериментов построены зависимости. На рисунках 1-3 представлены их графическое изображение.

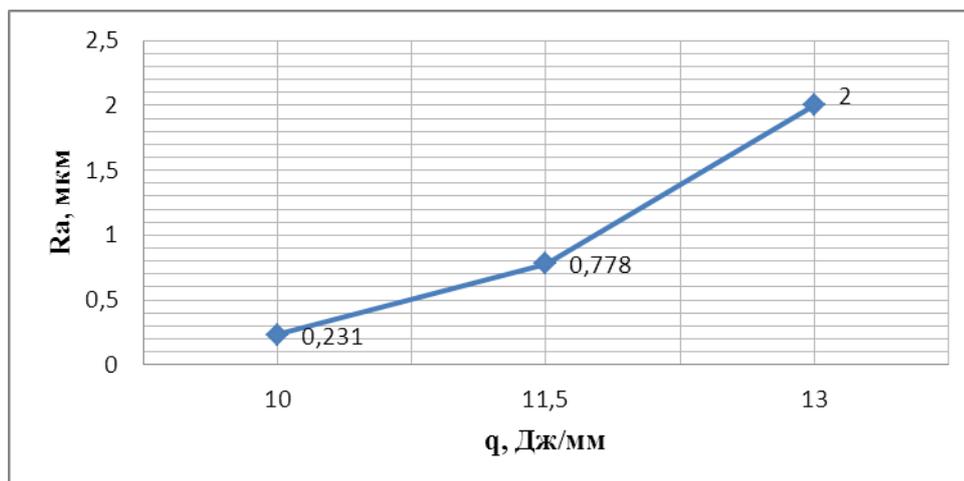


Рис. 1 – График зависимости  $Ra=f(q)$

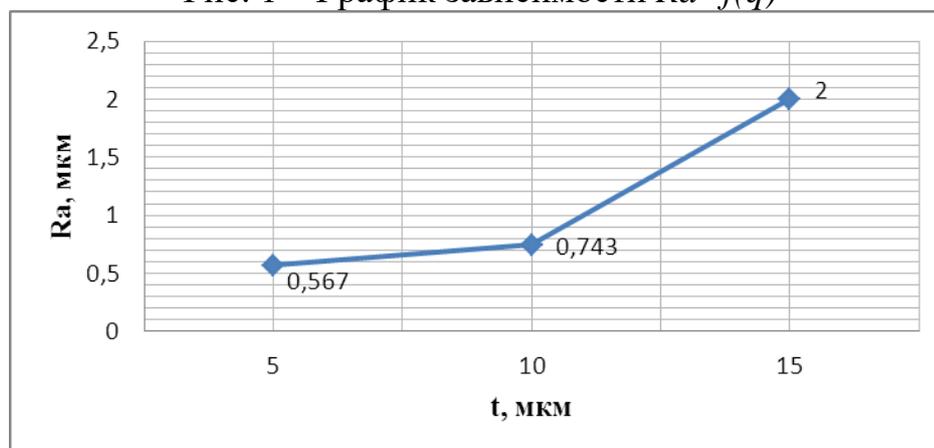


Рис. 2 – График зависимости  $Ra=f(t)$

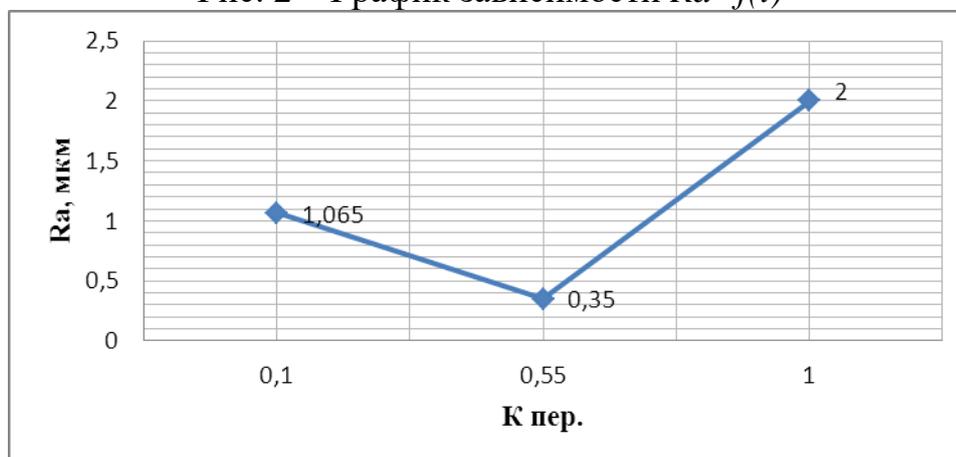


Рис. 3 – График зависимости  $Ra=f(K_{пер.})$

Как видно из приведенных данных:

1. С увеличением значений рассмотренных характеристик лазерной ТО  $q$ ,  $t$  и  $K_{пер}$  имеет место рост значений  $R_a$  упрочнённой поверхности. Это объясняется увеличением количества энергии (теплоты), передаваемой лазерным лучом упрочняемой поверхности с увеличением плотности энергии луча, с увеличением отражающей способности светопоглощающего покрытия при увеличении его толщины, с уменьшением степени отпуска упрочняемой

поверхности при увеличении коэффициента перекрытия дорожек лазерного нагрева поверхности.

2. Получена математическая модель указанных взаимосвязей  $Ra = f(q, t, K_{пер.})$

3. Показана её адекватность и достоверность входящих в неё коэффициентов.

1. Обработка металлов давлением в машиностроении /П.И. Полухин [и др.] - М. Машиностроение, 1983. – 273 с.
2. Астапчик, С.А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке/ С.А. Астапчик, В.С. Голубев, А.Г. Маклаков. – Минск, Белорус. Наука, 2008. – 251 с.
3. Коваленко, В.С. Лазерная технология.- Киев: Высш. шк., 1989. – 280с.
4. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн.6. Основы лазерного упрочнения сплавов/ Под ред. А.Г. Григорьянца.-М.: Высш. шк., 1988. – 159с.
5. Лисовский, А.Л. Лазерное упрочнение штампового инструмента/А.Л. Лисовский, И.В. Плетнёв.- Могилёв, // Вестник Белорусско-Российского университета, 2008, №3(20). – с. 90-94.
6. Голубев В.С. Лазерная поверхностная обработка материалов и пути повышения её эффективности / В.С. Голубев, В.И. Гуринович, И.А. Романчук. – Минск // Вестник Физико-Технического института НАНБ , №5, 2017.
7. Кане, М.М Основы исследований, изобретательства и инновационной деятельности в машиностроении: учебник / М.М. Кане. – Минск, Высшэйшая школа, 2018. – 366 с.

**УДК 621.793**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

**Керель А.Д.<sup>1</sup>, Ванюк Э.А.<sup>1</sup>, Сокоров И.О.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский Национальный Технический Университет

<sup>2</sup> УО «Республиканский институт профессионального образования»

Развитие машиностроения неразрывно связано с производством новых композиционных материалов и покрытий на основе полимеров. [1]. Полимерное покрытие – это эффективный и надежный способ улучшить эксплуатационные свойства металла и повысить его защитные качества.

В комплексе проблем повышения надежности и долговечности машин особое место занимает вопрос износостойкости и соответственно твердости деталей. Для решения задачи повышения эксплуатационных характеристик материалов привлекают новые методы поверхностного упрочнения, например, различные способы газотермического нанесения покрытий. [2].

Механическое воздействие на покрытие способствует нарушению его сплошности, что в свою очередь в условиях эксплуатации приводит к растворению защищаемого металла при взаимодействии с агрессивной средой. Как известно, механическое воздействие на поверхность покрытия приводит к изменению сначала поверхностных структурных состояний, а при более сильных воздействиях и к объемным необратимым структурным деформациям вплоть до разрушения. [3] Степень износа в первую очередь определяется уровнем механических свойств покрытия, который зависит от множества факторов: способ нанесения, химического состава и твердости покрытия.

В связи с этим, целью исследования является изучение твердости полимерных газотермических покрытий и выявление влияния наночастиц на твердость покрытий.

**Методика исследования.** Пластинки для нанесения материала подготавливают по ГОСТ 8832. Все условия подготовки материала, его нанесения, подготовки образца, его выдержка указываются в нормативно-технической документации на материал. Прибор устанавливают на прочное основание для исключения влияния вибрации и закрывают прозрачным колпаком. Предметный стол прибора выставляют строго горизонтально при помощи установочных винтов. Перед каждой серией испытаний опорные шарики прибора протирают ветошью, смоченной растворителем, и вытирают насухо. Затем включают прибор в сеть и выдерживают его тридцать минут. Перед началом испытаний маятник прибора выставляют на «нуль» отсчетной шкалы прибора. Для исключения случаев проскальзывания маятника в связи с возможным низким коэффициентом трения на поверхностях используем маятник типа А.

**Экспериментальная часть.** Испытание проводили в определённых условиях: температура  $20 \pm 2$  °С и относительная влажность воздуха  $65 \pm 5\%$ . Перед началом испытания необходимо оборудование проверяли на контрольной пластинке. Маятник устанавливается в нулевое положение. Затем маятник А отклоняют на  $6^\circ$  и фиксируется с помощью ограничителя хода. Маятник освобождают и фиксируют число колебаний после его остановки. Столик опускают, перемещают пластинку и повторяют испытание не менее чем в трёх разных участках пластинки.

В таблице 1 представлены составы порошковых материалов, используемых для исследования. В таблицу с результатами заносятся среднее арифметическое полученных результатов измерения времени или числа колебаний маятника. Отклонения значений единичных измерений от среднего арифметического не должно превышать 3%. Для наглядности результаты испытаний на твердость представлены в виде диаграммы на рисунке 1.

**Заключение.** Результаты исследований позволили определить покрытия с наибольшей твердостью: образцы № 2, 16 и 17, основой которых является материал МАВ. Образец под №11 на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с добавлением частиц алюминия показал перспективность применения исследуемого покрытия. Как известно алюминий обладает высокой

тепло- и электропроводностью, стойкостью к коррозии за счёт быстрого образования прочных оксидных плёнок, защищающих поверхность от дальнейшего взаимодействия.

Таблица 1 – Составы порошковых материалов, выбранных для исследований

№ образца	Составы порошковых материалов	№ образца	Составы порошковых материалов	Расшифровка
1	«Серый» Femida КР18АХ	10	«Черный» МАВ+5%Нано	Производитель – Белорусско-Иранское предприятие «БелПекаПейнт» Вид полимера: «СВМПЭ» – сверхвысокомолекулярный полиэтилен «Нано» - наноуглерод
2	«Красный» МАВ	11	СВМПЭ+20%Al	
3	«Черный» МАВ	12	«Серый» Femida +20%Al	
4	СВМПЭ	13	СВМПЭ + 20% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
5	СВМПЭ+10%Серый	14	СВМПЭ+10% «Зеленый» МАВ	
6	СВМПЭ+10%Красн	15	«Серый» МАВ	
7	СВМПЭ+10%Черный	15а	«Серый» МАВ	
8	СВМПЭ+10%Нано	16	«Зеленый» МАВ	
9	СВМПЭ+5%Нано	–	–	



Рисунок 1 – Результаты испытаний покрытий на твердость

1. В.А. Рогов, В.В. Соловьев, В.В. Копылов. Новые материалы в машиностроении. Москва: Учебное пособие, 2008.
2. Теория и практика газопламенного напыления / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Наука і тэхніка, 1993. – 295 с.
3. Акопов Е. Ю. Обоснование и выбор методов повышения ресурса погружных центробежных насосов [Текст]: дисс. канд. технич наук: 05.05.06: защищена 18.05.2017 / Акопов Енок Юрьевич. – М., 2017. –165 с.

## АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Zn-Al-Si-Cu ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ

**Комаров А.И., Орда Д.В., Сосновский И.А., Куриленок А.А.**

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

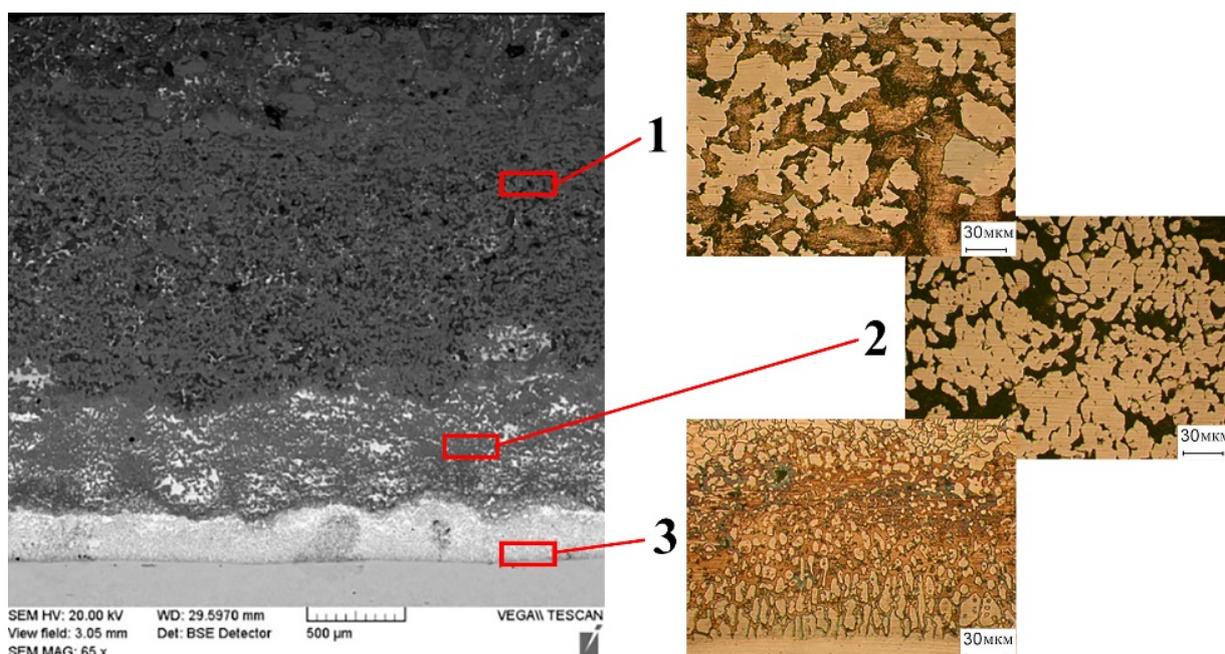
В работе представлены результаты исследования структуры покрытия сплава  $ZnAl_{33}Si_4Cu_3$ , полученного центробежной индукционной наплавкой за один технологический прием на стальную основу. При выборе состава сплава основывались на результатах применения сплава марки ЦА30М5 в качестве материала вкладыша подшипника скольжения. Согласно полученным ранее данным, введение в состав 30% Al обеспечивает повышение прочностных свойств материала, а дополнительное легирование обеспечивает хорошие триботехнические свойства. Таким образом, изготовленные подшипники скольжения по эксплуатационным свойствам не уступают бронзовым.

В настоящей работе в качестве шихтового материала использовали цинковый сплав марки ЦАМ4-1, алюминий-кремниевый сплав АК12 и медь. Формирование покрытия на внутренней поверхности стальной заготовки из стали 20 (ГОСТ 1050-88), проводилось совмещением методов центробежного формования предварительно подготовленной шихты с нагревом токами высокой частоты до температуры 740–760 °С, с последующей изотермической выдержкой при данной температуре в течение 5 мин. Частота вращения заготовки составляла 1250 мин<sup>-1</sup> [1].

Металлографический анализ покрытия показал, что структура имеет градиентное строение с оттеснением цинка и растворенного в процессе наплавки железа к стальной основе, а алюминия и кремния к поверхности. Согласно результатам сканирующей электронной микроскопии, у стальной основы находится более плотный слой на основе цинка, затем следует переходная зона и непосредственно слой покрытия (рисунок 1). Толщина верхнего слоя составляет 60...70% толщины наплавляемого покрытия.

Согласно полученным данным, у границы со сталью формируется диффузионный цинковый слой толщиной до 400 мкм, содержащий до 50 масс.% железа (зона 3, таблица 1). Структура слоя представлена зернами двух типов: столбчатыми зернами с повышенным содержанием Fe (70-80%), между которыми располагаются зерна цинкового сплава, содержащего 27-34% Fe.

За цинковым слоем следует переходная зона (600-700 мкм), состоящая из зерен тройной системы Fe-Al-Zn, между которыми располагаются зерна Zn-Al сплава. Следует отметить, что переходный слой имеет неравномерное распределение цинка по его структуре (зона 2, рисунок 1).



1 – основное покрытие; 2 – переходный слой; 3 – диффузионный цинковый слой  
Рисунок 1 – Структура покрытия из сплава ZnAl33Si4Cu3

Таблица 1 – Химический состав основных зон наплавленного покрытия

Зона	O	Al	Si	Fe	Cu	Zn
1	5.27	47.22	7.84	14.22	1.97	23.48
2	5.40	39.21	1.72	23.17	1.63	28.88
3	4.73	2.65	0.01	44.08	0.83	47.70

**Выводы.** Анализ структуры покрытия показал, что в процессе наплавки Zn-Al сплавов идет активное растворение стальной втулки, что приводит к насыщению расплава железом. Диффузия железа в расплав приводит к формированию интерметаллидных включений на основе систем Al-Fe и Al-Fe-Zn, которые выступают в качестве основной армирующей составляющей.

Цинк, под действием центробежных сил, ликвирует к стальной основе, формируя диффузионный слой с высоким содержанием цинка 50-60%. Формирование такой композиционной слоистой структуры с диффузионными переходами обеспечивает компенсацию линейного термического расширения сплава покрытия и стальной основы, что обеспечивает приемлемый уровень адгезии, а наличие твердых включений в мягкой матрице реализует принцип Шарпи, что повышает триботехнические характеристики.

1. Способ нанесения двухслойного покрытия на внутреннюю поверхность детали: пат. ВУ №23365 / М.А. Белоцерковский, А.И. Комаров, И.А. Сосновский, Д.В. Орда, А.А. Куриленок, Д.О. Искандарова. – Оpubл. 30.04.2021г.

## АЛМАЗОАБРАЗИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СВЕРХТВЁРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Костюкевич П.А., Кузей А.М., Лебедев В.Я., Францкевич А.В.**

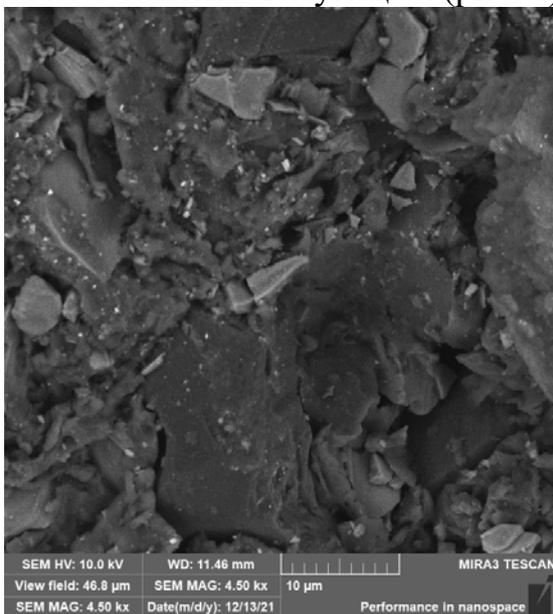
Государственное научное Учреждение «Физико-технический институт  
национальной академии наук Беларуси»

Алмазоабразивная обработка ряда материалов (керамики, твердых сплавов и т.д.) с постоянными значениями режущей способности (так называемый режим «самозатачивания») протекает в узком диапазоне режимов обработки, которые коррелируют с физико-химическими характеристиками алмазосодержащих композиционных материалов. Выход за пределы этих режимов сопровождается увеличением удельного расхода алмаза, потерей режущей способности инструмента. Восстановление режущей способности алмазоабразивного инструмента достигается абразивным, электрохимическим воздействием на матрицу (связку) композиционного материала, либо изменением силовых параметров обработки (в случае керамических связок). Наиболее широко для обработки сверхтвердых материалов применяется инструмент на керамических и полимерных связках (связующих), которые позволяют проводить обработку в режимах близких к режиму «самозатачивания».

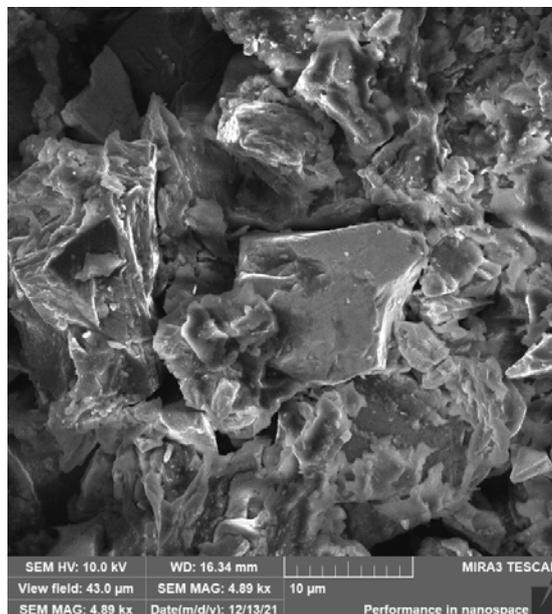
В отличие от керамических и металлических связок, связки с полимерным связующим имеют низкие прочностные характеристики (предел прочности при сжатии и твердость). В связи с этим алмазоабразивный инструмент как правило позволяет обрабатывать широкую гамму материалов, для каждого из которых существует диапазон параметров обработки, в которых износ алмазосодержащего композиционного материала протекает в режиме «самозатачивания».

Применение в технологическом процессе изготовления инструмента связующего в жидком состоянии позволяет повысить равномерность его распределения в композиционных материалах с высоким содержанием (70 об.%) наполнителя, в независимости от остальных технологических операций его изготовления. В работе изучено влияние объёмного содержания связующего и пор в алмазосодержащем композиционном материале на эксплуатационные характеристики алмазоабразивного инструмента формы 1A1 (150×5×6×32). Твердость композиционного материала алмаз (АСН 28/20 – 35 об.%; карбид кремния – 35 об.%; связующее (СФП-012А) – 30 об.%) при концентрации в нем пор 7 об.% и 21 об.% составляет 77 НРВ и 58 НРВ соответственно. Производительность обработки монокристалла алмаза инструментом с композиционными материалами (7 об.% и 21 об.% пор) составила 0,46 мг/мин и 0,53 мг/мин при удельном расходе 81 мг/мг и 94 мг/мг соответственно.

Морфологии поверхности износа алмазосодержащих композиционных материалов представляют собой зерна алмаза с площадками износа, либо со следами хрупкого разрушения, и частицы карбида кремния, объединенные прослойками связующего, равномерно распределенными между ними. Множественные стыки между частицами карбида кремния и алмазными зернами заполнены связующим (рис. 1).



а



б

Рисунок 1 – Морфология поверхностей износа алмазосодержащих композиционных материалов. Концентрация связующего в композиционных материалах 30 об.%. Концентрация пор: а - 7; б - 21 об.%

Увеличение размеров зерен алмаза (50/40 мкм) при прочих равных условиях приводит к увеличению производительности обработки заготовок монокристаллов синтетического алмаза. Производительность обработки заготовок синтетического алмаза кругами с композиционными материалами (содержащими 40 об.% связующего) с 7 и 21 об.% пор составила 1,4 и 1,68 мг/мин при удельном расходе алмаза 73 и 84 мг/мг соответственно. Производительность обработки заготовок синтетического алмаза кругами с композиционными материалами (30 об.% связующего) составила 1,9 и 2,3 мг/мин, при удельном расходе алмаза 79 и 92 мг/мг соответственно. Морфологии поверхностей износа алмазосодержащих композиционных материалов представляют собой в различной степени изношенные (с площадками износа и сколами на вершинах) алмазные зерна и связку со следами износа частиц карбида кремния и порами.

Морфологии поверхностей износа композиционных материалов дают основание полагать, что увеличение производительности обработки и снижение удельного расхода алмаза при использовании в технологическом процессе изготовления алмазобрабатывающего инструмента связующего в виде раствора позволяет повысить равномерность его распределения между компонентами шихты и влиять на механизм изнашивания.

## ФАКТОР ИНВЕРСИОННОСТИ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ КАК ПРЕДПОСЫЛКА РЕАЛИЗАЦИИ СОВМЕЩЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Кульгейко М.П.<sup>1</sup>, Петришин Г.В.<sup>2</sup>, Кульгейко Г.С.<sup>2</sup>

- 1) Белорусский государственный университет транспорта, Гомель;  
2) Гомельский государственный технический университет им. П.О.Сухого, Республика Беларусь.

В настоящее время одним из главных и основополагающих методологических подходов к созданию современных технологий является принцип совмещенности [1]. Реализация принципа совмещенности предполагает не просто объединение объектов или только суммирование выполняемых ими функций. Речь идет о совмещенности выполнения функций объектами во времени и в пространстве при сокращении их общего количества, что достигается за счет эффекта совместного действия, т.е. синергетического эффекта. Это возможно в условиях преемственности и взаимосвязанности технологий. К таким технологиям относятся, в частности, процессы магнитно-электрической обработки (МЭО), реализующие различные технологические направления генерации поверхностей деталей [2].

Магнитно-электрические способы обработки представляют комплекс взаимосвязанных технологий, характеризующихся рядом общих условий их реализации, так как они базируются на использовании одних и тех же энергетических факторов: магнитного поля, электрического тока и механического силового воздействия. Магнитно-абразивную обработку (МАО) и магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ) можно проводить на одном и том же оборудовании [3], так как в обоих процессах силовым источником и упругой инструментальной связкой является энергия магнитного поля. В обоих процессах могут применяться одни и те же порошковые ферроабразивные материалы, т.е. ферромагнитные абразивы для чистовой обработки деталей могут использоваться для формирования упрочняющих покрытий.

Одним из первых практически освоенных способов МЭО является магнитно-абразивная обработка, реализующая первое технологическое направление генерации поверхности [2], т.е. образование поверхностного слоя путем удаления материала и формирования заданной микрогеометрии. Условная символьная запись процесса МАО может быть представлена в виде:

$$[\bar{B}(c \vee \omega t \vee \tau)] \perp \vee // [\bar{I}(c \vee \omega t \vee 0) \wedge f(B, V)] \perp [V(c \vee c \wedge \tau)] \Rightarrow P \vee (P \wedge T \wedge R)$$

Тогда краткая интерпретация записи будет следующая. Возможно использование энергии постоянного, переменного или импульсного магнитного поля. Электрический ток может быть постоянным, переменным или вообще

отсутствовать, но в любом случае он индуцируется при перемещении рабочих элементов системы в магнитном поле. Механическое движение – постоянное равномерное или с дополнительным импульсным (осциллирующим). При этом векторы энергетического воздействия взаимно перпендикулярны или векторы  $\bar{B}$  и  $\bar{I}$  могут быть параллельными. Энергетическое преобразование факторов – преимущественно в механическую работу, с возможностью дополнительного преобразования в тепловую и химическую энергию.

Вторым способом МЭО по времени появления, уровню практического освоения и глубине теоретической проработки является магнитно-электрическое упрочнение. Технология МЭУ реализует четвертое технологическое направление генерации поверхности [2], т.е. формирование поверхностного слоя путем нанесения дополнительного материала на поверхность детали. Условная символьная запись процесса МЭУ имеет вид:

$$[\bar{B}(c \vee \omega t \vee \tau)] \perp \vee // [\bar{I}(c \vee \omega t \vee \tau)] \perp \vee // [V(c \vee c \wedge \tau) \wedge f(B, I)] \Rightarrow T \wedge R$$

Интерпретация векторной записи следующая. Упрочнение осуществляется при постоянном, переменном или импульсном воздействии магнитного поля и электрического тока. Механическое движение может быть постоянным или с дополнительным импульсным активированием. Кроме того, механическое перемещение осуществляется как результат взаимодействия магнитного поля и электрического тока. При этом векторы  $\bar{B}$ ,  $\bar{I}$  и  $V$  могут быть взаимно перпендикулярными и параллельными в любых их сочетаниях. Энергетическое преобразование факторов процесса – в тепловую и химическую энергию.

Следовательно, магнитно-абразивную обработку и магнитно-электрическое упрочнение объединяет такое свойство как инверсионность процессов, т.е. их обратимость при соответствующем задании параметров реализации. Совмещенность способов МЭО основывается на общности энергетических факторов процессов, их технического и технологического оснащения. Здесь важным является не только непрерывность, преемственность и взаимосвязанность технологий [1], но и свойство инверсионности факторов и параметров процессов обработки. Это свойство особенно важно при проектировании технологических модулей совмещенной обработки.

1. Высокие технологии размерной обработки в машиностроении / А.Д.Никифоров [и др.]. – М.: Высш.шк., 2007. – 327с.

2. Кульгейко, М.П. Роль инверсионности способов магнитно-электрической обработки при создании технологических комплексов генерации поверхностей/ М.П.Кульгейко, Г.В.Петришин, Н.М.Симанович // Вестник Белорусско-Российского ун-та. – 2020. – №4(69). – С.21-30.

3. Мрочек, Ж.А. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин / Ж.А.Мрочек, Л.М.Кожуро, И.П.Филонов. – Мн.: УП «Технопринт», 2000. –268с.

## СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНОСТИ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ И ФОРМЫ

**Лебеденко О.С.**

Mahr GmbH, представительство в России.

Сегодня существует разрыв между западным вниманием к вопросам измерения поверхности и формы деталей после точной металлообработки, западными стандартами и технологиями и подходами, используемыми в России и Белоруссии.

На многих наших предприятиях до сих пор используются субъективные методы контроля поверхности деталей, связанные с визуальной и тактильной оценкой параметров шероховатости. Данный метод, безусловно, имеет свои преимущества. Однако, существенными недостатками данного метода является большое влияние субъективных факторов и низкая его точность, что в условиях жестких допусков на размеры и большого разнообразия используемых материалов и методов обработки существенно снижает его достоверность.

Если же на наших предприятиях используются приборы для измерения шероховатости, то чаще всего измеряется параметр Ra, который обладает высокой повторяемостью и в некоторой степени характеризует состояние поверхности, но он не учитывает методы обработки и другие важные характеристики поверхности, существенно влияющие на функциональность изготовленных изделий.

Для оценки погрешностей формы сегодня у нас, как правило, используются методы допускового контроля, чаще всего – предельные калибры. При присущих этим методам преимуществах они не дают информацию о реальном значении погрешностей формы, подвержены существенному влиянию субъективных факторов и являются недостаточно точными для жестких допусков. Данные методы контроля поверхности и формы часто не позволяют получать требуемое качество изготавливаемых деталей, что приводит к плохим характеристикам посадки, трудностями при сборке, неравномерностью перемещения, уменьшенными механическими нагрузками и сроком службы изделий, и другими проблемами.

На сегодняшний день в Европе принят целый ряд новых стандартов в области метрологии поверхности и формы. Изменен сам подход к измерениям и указывается на чертежах требованиям к геометрии деталей. С данной темой также тесно связана тема оценки неопределенности измерений, которая также давно стандартизована и внедрена на Западе, но только осваивается и внедряется в наших метрологических институтах и на предприятиях.

Различные виды обработки деталей приводят к различным характеристикам поверхностей. Например, обработка точением приводит к появлению периодического профиля шероховатости, а при хонинговании

профиль шероховатости имеет сложную структуру, которая не может быть оценена с помощью параметров Ra и Rz и требует использования специального семейства параметров. На функциональные характеристики изготавливаемых деталей существенное влияние оказывает волнистость поверхности, которая практически не измеряется на наших предприятиях, но, при этом, может иметь большую долю в общей погрешности поверхности изготовленной детали.

Сегодня существуют современные мощные системы для контроля поверхности деталей. Активно развиваются как контактные, так и бесконтактные методы измерений. Контактные приборы для измерения поверхности могут использовать опорный и безопорный метод измерения, быть мобильными или стационарными, иметь разную степень автоматизации.

В старых и новых стандартах по метрологии поверхности, а также в стандартах, применяемых в разных странах, часто используются одинаковые обозначения для параметров поверхности, рассчитываемых по разным методикам. Из-за этого возникают дополнительные трудности при определении параметров поверхности.

В стандарте ИСО 14660–1, 2:1999 (в России ГОСТ 31254–2004) даны новые определения геометрических элементов. Теперь они существуют в трех «мирах»: мире чертежа, мире производства детали и мире измерений, где представление детали осуществляется с помощью ограниченного числа точек. ИСО 286–1:2010 (в России ГОСТ 25346–2013) определяет действительный размер как размер присоединенного полного элемента, а местный размер – размер выявленного элемента между двумя противоположными точками. В ИСО 1101:2012 (в России ГОСТ Р 53442–2015) погрешность формы учитывается, а не исключается, а критерием оценки соответствия допуску является сопоставление выявленного элемента, а не наибольшего отклонения с полем допуска.

Существующие сегодня средства измерений обеспечивают измерения в соответствии со стандартами и существенно расширяют возможности сбора данных о погрешностях формы и поверхности деталей. К ним относятся опорные и безопорные профилометры, приборы для измерения контура поверхности, трехкоординатные оптические микроскопы и профилометры, приборы для измерения погрешностей формы (кругломеры), трехточечные ручные средства измерений и другие инструменты, приборы и системы. Использование новых стандартов и технологий позволяет существенно повысить качество изготавливаемых изделий, снизить себестоимость продукции и повысить конкурентоспособность предприятий, использующих данные подходы и технологии.

## **ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ПРОЦЕССЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ**

**Минько Д.В., Шиманович О.А.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Пластическая деформация является одним из самых распространенных методов формообразования материалов. В отличие от других методов, например, обработки резанием, пластическая деформация позволяет изменять структуру материала, модифицируя его свойства. Однако в некоторых случаях пластическая деформация может быть затруднена, что требует использования специальных методов, которые сами по себе не вызывают деформации, но приводят к существенному ее облегчению. Один из таких методов, включающий прямое электроимпульсное воздействие на проводящий материал, получил название электропластического деформирования (ЭПД) [1]. Для реализации ЭПД требуется, чтобы металл находился под механическими напряжениями выше предела текучести, а скорость деформации была соизмерима со скоростью дрейфа свободных электронов.

ЭПД может успешно применяться наряду с джоулевым эффектом в ставших уже традиционными способах обработки металлов давлением с использованием электрического тока, таких как электроконтактный и индукционный нагрев. Электроимпульсное воздействие позволяет повысить пластичность металла, улучшить его структуру и физико-механические свойства, экономить энергию при волочении, прокатке и штамповке металла за счет снижения усилий обработки [2]. Появляется возможность при низких и умеренных температурах обрабатывать наиболее труднодеформируемые и хрупкие материалы, к которым относятся и некоторые тугоплавкие металлы [3].

Наибольший практический интерес представляет наличие прямого вклада импульсного тока в пластическую деформацию металла по механизму дополнительных эффективных напряжений, которые возникают за счет передачи импульсов силы и энергии от потока электронов проводимости на движущиеся дислокации и дислокации в скоплениях.

Существует оптимальная частота следования импульсов (либо серий импульсов), зависящих от скорости деформации металла, при которой к приходу каждого из последующих импульсов успевают появиться неравновесные группы дислокаций и степень пластической деформации выходит на максимальный уровень. Из трех параметров электроимпульсного воздействия – амплитуды, длительности и частоты повторения отдельных импульсов – наибольшее влияние на пластичность во время деформации металла оказывают первые два, влияние параметра частоты импульсного воздействия сильно зависит от

скорости деформации. Увеличение частоты электроимпульсного воздействия может привести даже к снижению пластичности, т.к. каждый последующий импульс имеет дело с уже равновесными дислокационными группами, сорванными предыдущим импульсом, а новые неравновесные группы еще не успевают сформироваться. Эффективность ЭПД можно повысить, используя короткие серии импульсов и приостанавливая активное деформирование металла на момент пропуска серий с целью предотвращения отрицательного влияния упрочнения.

При практическом использовании ЭПД требуется учитывать ограничения по сечению заготовок из-за сложности создания в зоне деформации высоких плотностей тока порядка  $10^4$ - $10^5$  А/мм<sup>2</sup>, отсутствие промышленных импульсных источников, а также необходимость модернизации действующего технологического оборудования с целью подачи электрических импульсов непосредственно в зону пластической деформации металла. В отличие от электроконтактного нагрева, зона электроимпульсного воздействия должна быть до предела уменьшена с целью предупреждения чрезмерного нагрева, за исключением тех случаев, когда материал при низких температурах вообще не деформируется (например, вольфрам и его сплавы).

Применение ЭПД позволит решить задачу повышения пластичности металлов путем избирательного воздействия на материал только в очаге деформации, что приведет к существенному снижению энергоемкости и осуществлению позонной интенсификации технологических процессов обработки давлением, таких как волочение, прокатка, штамповка, вытяжка и др. Кроме того, такое направленное воздействие открывает перспективы получения из однородных заготовок композиционных материалов с периодически измененными свойствами – слоистых, поверхностно упрочненных, функционально-градиентных. Экологическая чистота и экономичность, высокая скорость и энергоэффективность воздействия, возможность комбинирования с джоулевым эффектом с достижением практически любых сопутствующих температур также позволяют говорить о перспективности применения электроимпульсного воздействия в процессе пластического деформирования тугоплавких металлов.

1. Троицкий, О.А. Физические основы и технологии обработки современных материалов. Теория, технология, структура и свойства. В 2 т. / О.А. Троицкий, Ю.В. Баранов, Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004.
2. Троицкий, О.А. Электропластический эффект в металлах / О.А. Троицкий // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – № 9. – С. 65-76.
3. Пономарев, Т.С. Электропластический эффект при изгибе проволоки из вольфрама / Т.С. Пономарев [и др.] // Актуальные проблемы прочности: материалы международной научной конференции, Витебск, 25-29 мая 2020 г. / под ред. В.В. Рубаника. – Молодечно: Типография «Победа», 2020. – С. 296-298.

## СОВМЕЩЕННАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ НАРУЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

Миранович А.В., Акулович Л.М.

Белорусский государственный аграрный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Для повышения срока службы деталей машин, работающих в условиях коррозионно-абразивного изнашивания, в машиностроении широко применяют технологии термического упрочнения, нанесения покрытий, а также способы плазменного и лазерного модифицирования поверхностей, обеспечивающие формирование наноструктурированных поверхностных слоев высокой твердости [1]. Рациональное сочетание материалов трущихся деталей и технологий их упрочнения с образованием защитных градиентных покрытий на рабочих поверхностях позволяет обеспечивать комплекс физико-механических характеристик поверхностных слоев, соответствующий эксплуатационным требованиям в конкретных условиях работы. Однако опыт применения технологий упрочнения поверхностей показывает, что каждый из известных способов имеет свою конкретную область рационального применения, а некоторые из них исчерпали свои возможности. Поэтому актуальным является одновременное воздействие на упрочняемую поверхность несколькими видами энергии, например, механической, химической, тепловой, электромагнитной, лучевой и др. Такое воздействие высокоэнергетическими концентрированными потоками энергии реализуют современные электрофизические и электрохимические методы. Способы, основанные на использовании энергии света и магнитного поля, которая является естественным неисчерпаемым источником, наиболее перспективны. Электромагнитные потоки наиболее просты в реализации и удобны в управлении, что является предпосылкой для создания технологий комбинированной упрочняющей размерной обработки [2], например, при совмещении магнитно-электрического упрочнения (МЭУ) (рисунок 1) со шлифованием (*а*) и с поверхностным пластическим деформированием (ППД) (*б*).

При классической схеме МЭУ наружных цилиндрических поверхностей заготовку 1 располагают относительно полюсного наконечника электромагнита 2 (см. рис. 1) с определенным зазором, а полюсный наконечник и заготовку подключают к источнику импульсного технологического тока 6. В зазор из бункера-дозатора 4 подают ферромагнитный порошок (ФМП), частицы которого при попадании в рабочий зазор выстраиваются под действием магнитного поля в токопроводящие «цепочки» 3 и замыкают электрическую цепь. При прохождении электрического разряда по «цепочке» частицы ФМП в местах контакта оплавляются, и расплав наносится на поверхность заготовки в виде точечных вкраплений. Упрочненный слой формируется путем

образования на поверхности детали множества точечных вкраплений из материала частиц порошка. Первоначально на поверхности формируются единичные точечные вкрапления округлой формы, затем участки между ними заполняются новыми вкраплениями. После МЭУ шероховатость поверхности находится в пределах  $Ra\ 12.5...40$  (мкм), что требует последующей чистовой обработки.

Шлифование можно совместить с МЭУ (рисунок 1, а), соблюдая постоянство расстояния от образующей абразивного круга до оси детали, что обеспечит нанесение покрытия заданной толщины.

При совмещении МЭУ с ППД (рисунок 1, б) для разогрева поверхностного слоя используется технологическое тепло, образовавшееся от прохождения энергии электрических разрядов при МЭУ. Шероховатость поверхности после комбинированного упрочнения находится в пределах  $Ra\ 1,25 \dots 0,63$  (мкм) и увеличивается опорная поверхность (рисунок 2), характеризующая распределение металла по высоте в шероховатом поверхностном слое.

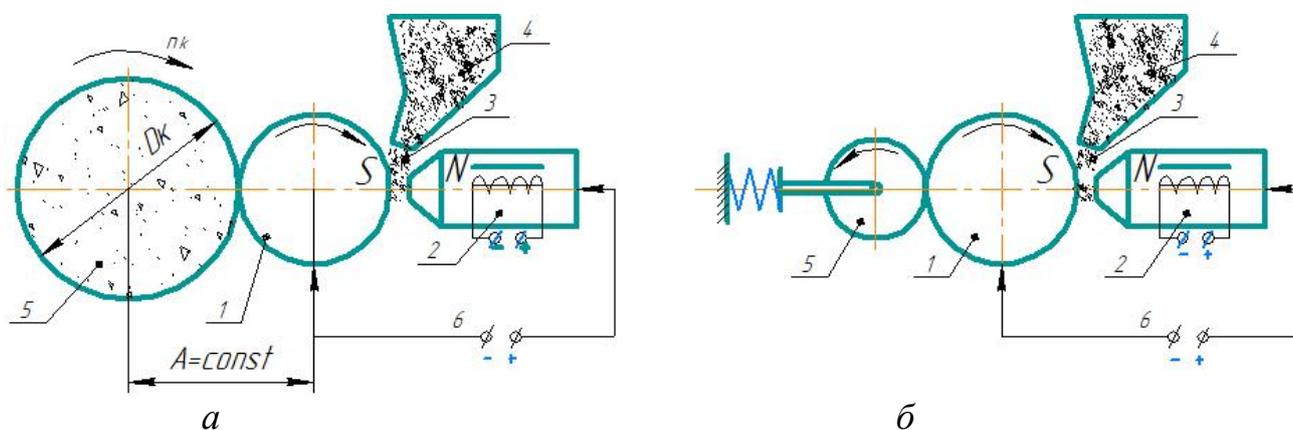


Рисунок 1 – Схема совмещения МЭУ со шлифованием (а) и с ППД (б):  
 1 – заготовка; 2 – электромагнит; 3 – ферромагнитный порошок; 4 – бункер-дозатор; 5 – шлифовальный круг (а), 5 – деформирующий инструмент (б); 6 – источник разрядного тока

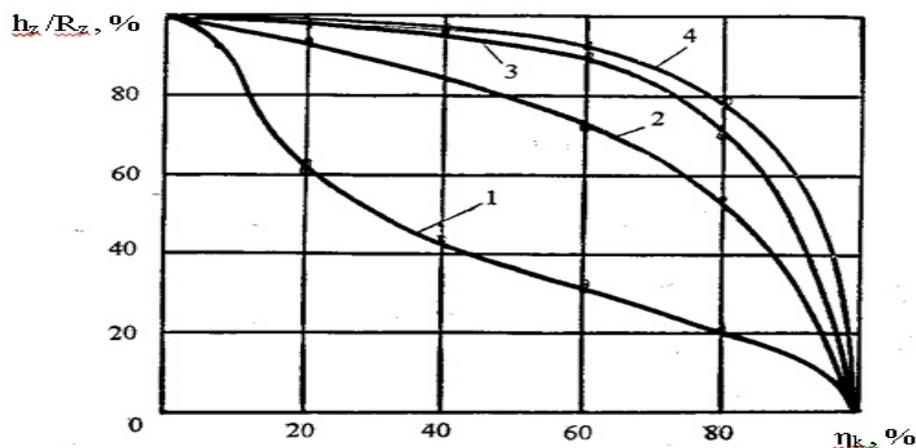


Рисунок 2 – Опорные кривые упрочненных поверхностей: 1 – МЭУ, 2 – МЭУ с ППД, 3 и 4 – МЭУ со шлифованием;  $h_z$  – высота уровней;  $R_z$  – высота неровностей;  $\eta_k$  – отношение отрезков внутри контура ко всей длине

Установлено:

- предложенная схема совмещения МЭУ со шлифованием позволяет контролировать толщину наносимого покрытия;
- опорная поверхность после совмещения МЭУ с чистовыми способами обработки увеличивается в 2...3 раза.

1. Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин / В. Б. Альгин [и др.] ; под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск : Беларус. Навука. 2010. – 109 с.
2. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В. И. Бородавко [и др.]; под общ. ред. М. Л. Хейфеца и С. А. Клименко. – Минск : Беларуская навука. 2013. – 463 с.

УДК 621.192

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ**

**Михайлов М.И., Кирпичев Е.А., Лукьянчик К.В., Мякенький А.Г.**

Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого  
Гомель, Республика Беларусь

Как известно, применяются четыре способа фрезерования отверстий [1]. При первом способе – фреза вводится в центр отлитого или предварительно просверленного отверстия с ускоренной подачей. После включения вращения шпинделя фрезу с рабочей подачей перемещают по оси, перпендикулярной направлению движения. При этом осуществляется два вида подхода фрезы к точке, лежащей на круговой эквидистанте. В первом случае фрезу сразу же подводят к точке, после чего осуществляют фрезерование с использованием круговой интерполяции в плоскости. Но в этом случае при быстрой смене направления фрезерования происходит изменение жёсткости технологической системы, в результате чего образуется зарез на поверхности отверстия. Чтобы избежать этого, участок подхода фрезы разбивается на два участка, и на втором участке снижают рабочую подачу. Кроме того, может быть принят такой случай, когда после касания фрезой окружности производится останов движения подачи и после некоторого промежутка времени возобновляется обработка по дуге окружности. Если производится обработка большого отверстия с предварительно полученным отверстием, то фрезу следует подводить не в центр отверстия, а к его краю, что даёт возможность уменьшить время подхода к обрабатываемой поверхности. Отличие второго способа от первого заключается в том, что фреза не прямо подходит к поверхности обрабатываемого отверстия, а по определённому радиусу, что уменьшает влияние изменения действия сил технологической системы.

Третий способ фрезерования отверстий может быть двух видов: двух- и четырёх полюсные спирали. Спирали, так же как и архимедова спираль, удовлетворяют условию непрерывности первой производной. Двухполюсная спираль образуется из сопряжения дуг полуокружностей, центры которых поочерёдно находятся на двух полюсах. Расстояние между полюсами равно шагу спирали. Один из полюсов располагается в центре обрабатываемого отверстия. Четырёх полюсная спираль образуется из сопряженных четвертей с центром в полюсах, которые располагаются в вершинах квадрата со стороной, равной четверти шага спирали. Квадрат строят так, чтобы одна из его вершин совпала с центром обрабатываемого отверстия, а стороны квадрата были параллельны осям окружностей. Четырёх полюсная спираль удобна для программирования, поскольку каждая из образующих дуг окружностей расположена в пределах одного квадрата.

Четвёртый способ фрезерования отверстий основан на применении трёхкоординатной винтовой интерполяции, при которой круговую интерполяцию в плоскости совмещают с одновременной интерполяцией по третьей координате.

В связи с тем, что обрабатываемая поверхность и деталь симметричны, использовался участок, на котором проходит обработка, а так же прижим, который закрепляет данную деталь (рис. 1).

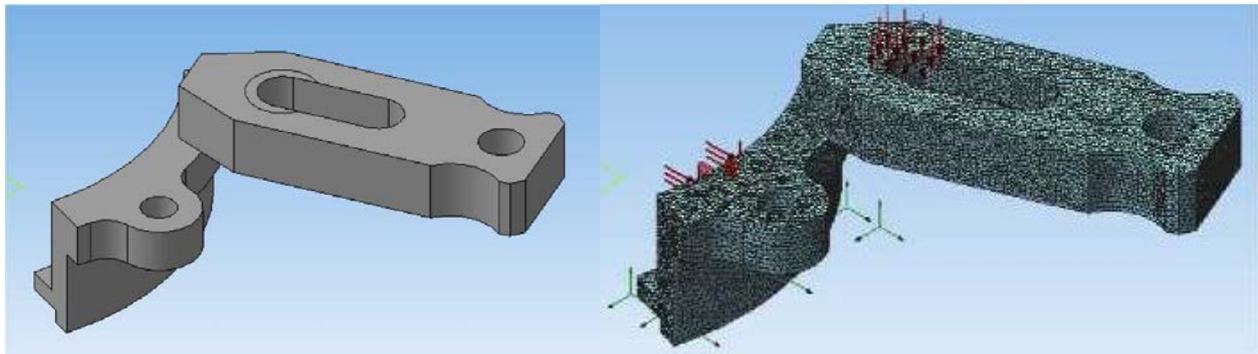


Рис. 1 – 3D модель расчетной схемы

Расчет производился с использованием метода конечных элементов в системе КОМПАС-3D. Рассмотрен вариант, при котором обработка происходит за один проход. Зубья фрезы расположены равномерно с углом равным  $60^\circ$ . При обработке отверстия  $D=22,5$  мм в одновременном контакте находились три зуба фрезы. Максимальные отклонения образующей детали равны алгебраической сумме перемещений детали и фрезы.

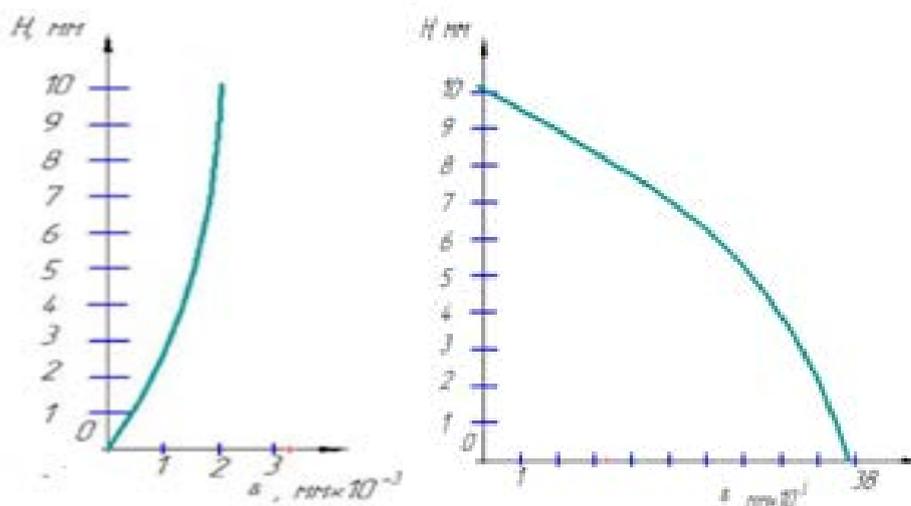


Рис. 2 – Графики перемещений по оси X детали (а) и фрезы (б)

1. Капустин, Н.М. Автоматизация проектирования технологических процессов в машиностроении /Н.М.Капустин. - М.: Машиностроение, Берлин: Техник, 1985. - 304 с.

УДК 621.91.01

## РАСЧЕТ ДЛИНЫ СРЕЗАЕМОГО СЛОЯ ПРИ ВИХРЕВОЙ ОБРАБОТКЕ

**Михайлов М.И., Никитенко Д.В., Тетерич Н.Э.**

Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого  
Гомель, Республика Беларусь

Основными параметрами срезаемого слоя для любого вида лезвийной обработки являются его толщина, ширина и длина. Анализу длины срезаемого слоя при вихревой обработке посвящены отдельные работы [1, 2]. При этом формулы для вычисления длины срезаемого слоя, предлагаемые в этих работах, являются приближенными, так как при выводе формул реальную пространственную траекторию движения точки режущей кромки заменяли плоской кривой. Так в работе [1] в качестве траектории результирующего движения резания принята дуга окружности, а в работе [2] удлиненная эпициклоида при встречном фрезеровании, и удлиненная гипоциклоида при попутном фрезеровании.

Используя данные работы [3] параметрические уравнения, описывающие траекторию движения точки вершины резца (верхние знаки соответствуют встречному фрезерованию, нижние попутному) имеют вид:

$$\begin{aligned}
 x(\omega) &= \pm R_a (\sin m\omega \sin\omega \cos\varepsilon - \cos m\omega \cos\omega) - a \cos\omega, \\
 y(\omega) &= R_a (\sin m\omega \cos\omega \cos\varepsilon \pm \cos m\omega \sin\omega) \pm a \sin\omega, \\
 z(\omega) &= R_a \sin m\omega \sin\varepsilon - \omega p.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $R_a$  - радиус вершин зубьев инструментальной головки;  $\varepsilon$  - угол наклона инструментальной головки;  $a$  - кратчайшее расстояние между осями заготовки и инструментальной головки;  $p$  - винтовой параметр поверхности с шагом  $P$ ;  $\omega$  - угол поворота заготовки;  $m$  - относительная частота вращения.

Длина дуги между точками 1 и 2 при встречном фрезеровании (рисунок 1, а) и точками 3 и 1 при попутном фрезеровании (рисунок 1, б) является длиной срезаемого слоя, которая определяется по формуле:

$$L = \int_{\omega_n}^{\omega_k} \sqrt{\left(\frac{dx}{d\omega}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\omega}\right)^2 + \left(\frac{dz}{d\omega}\right)^2} d\omega = \int_{\omega_n}^{\omega_k} \sqrt{A \cos^2 m\omega + B \cos m\omega + C} d\omega; (2)$$

$$A = R_a^2 \sin^2 \varepsilon;$$

$$B = 2R_a (a (1 \pm m \cos \varepsilon) - m p \sin \varepsilon); (3)$$

$$C = R_a^2 (\cos \varepsilon (\cos \varepsilon \pm 2m) + m^2) + a^2 + p^2.$$

Для вычисления начального (попутное фрезерование) и конечного (встречное фрезерование) значений параметра  $\omega$  в точках 3 и 2 использовалось уравнение:

$$x(\omega)^2 + y(\omega)^2 = r^2; (4)$$

где  $r$  - радиус наружной поверхности детали.

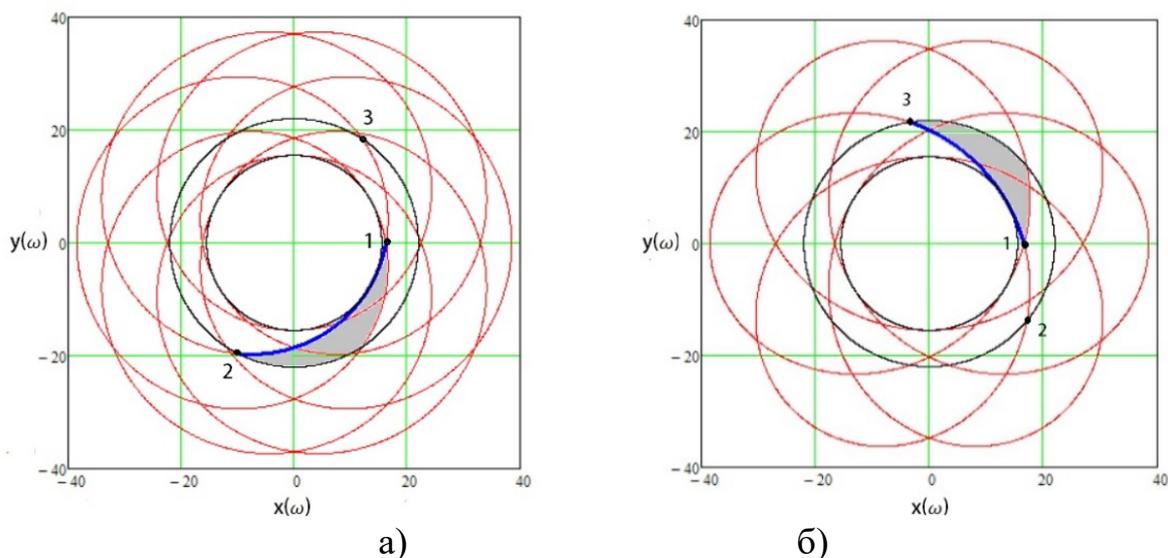


Рис. 1 – Срезаемый слой при вихревом фрезеровании:  
а – встречное фрезерование; б – попутное фрезерование

Для вычисления начального (встречное фрезерование) и конечного (попутное фрезерование) значений параметра  $\omega$  в точке 1 было решено трансцендентное уравнение  $Y(\omega) = 0$ . Так, например, при вихревом фрезеровании резьбы ходового винта токарного станка с шагом 12 мм ( $r=22$  мм,  $R_a=27$  мм,  $m=60$ ,  $\varepsilon=7^\circ$ ,  $a=11,5$  мм,  $k=0$ ) длина срезаемого слоя составляет: для встречного фрезерования  $L = 26,2$  мм; для попутного фрезерования  $L = 25,7$  мм.

1. Виксман, Е.С. Скоростное нарезание резьб и червяков: (вихревое нарезание вращающимися резцами) / Е.С. Виксман. - М.: Машиностроение, 1966. - 91 с.
2. Емелик, М. И. Кинематика охватывающего фрезерования / М.И. Емелик // Вестник машиностроения. - 1958. - №8. - С. 47-50.
3. Никитенко, Д.В. Толщина срезаемого слоя при внутреннем фрезеровании винтовых поверхностей трапецеидального профиля / Д.В. Никитенко, М.И. Михайлов // Вестник ГГТУ имени П.О. Сухого: научно-практический журнал. – 2021. - №1. – С. 25-32.
4. Михайлов, М.И. Расчет величины огранки при вихревом фрезеровании цилиндрических поверхностей / М.И. Михайлов, Д.В. Никитенко, В.И. Кузьмич // Вестник ГГТУ имени П.О. Сухого: научно-практический журнал. - 2017. - №4. – С. 3-9

УДК 621.793

## **ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРОВОЛОЧНОГО ВОРСА НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОКРЫТИЯ, СФОРМИРОВАННОГО МЕТОДОМ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПЛАКИРОВАНИЯ ГИБКИМ ИНСТРУМЕНТОМ**

**Пилипчук Е.В.**

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

**Введение.** В гидроцилиндрах возвратно-поступательного движения, для герметизации подвижного штока используют манжетные резиновые уплотнения. Для обеспечения от коррозии и износа поверхность штока подвергают гальваническому хромированию [1]. Однако, учитывая вредность гальванических производств, а также их высокую энергоемкость и низкую эффективность, активно проводится поиск новых технологий, альтернативных гальваническому хромированию. Известны положительные примеры формирования хромсодержащих покрытий методами гиперзвуковой металлизации, газотермического и плазменного напыления, электроискрового и лазерного легирования, однако широкого применения подобные технологии пока не получили.

В последнее время активно развивается сравнительно недорогая, малоэнергоемкая и экологически чистая технология, основанная на методе деформационного плакирования гибким инструментом (ДПГИ). В ходе ранее проводимых испытаний покрытий, сформированных с использованием технологии ДПГИ, было выявлено, что определенное влияние на качество формируемых слоев хромовых покрытий может оказывать материал проволочного ворса ВМЩ.

**Цель исследований** заключалась в изучении структурно-фазового состава и параметров шероховатости поверхности слоев хромовых покрытий, сформированных различными ВМЩ.

**Методика исследований.** Структурно-фазовые исследования и оценка параметра шероховатости поверхности *Ra* проводились на образцах размером 10×6×2 мм, выполненных из стали 45 (HRC 43...45), с хромовым покрытием, сформированным из донора, полученного методами порошковой металлургии путем спекания смеси порошков чистого хрома и наноразмерной алмазнографитной шихты УДАГ (не более 1 мас.%). Деформационное плакирование осуществлялось вращающимися металлическими щетками с гофрированным ворсом, выполненным из стали 65Г и нержавеющей стали 03Х17Н14М2.

После обработки среднее значение толщины сформированного слоя покрытия, измеренной с помощью прибора МТЦ-3, составило 3...5 мкм для покрытий, сформированных щёткой с ворсом, выполненным из стали 65Г, и 10...12 мкм – для покрытий, сформированных щёткой с ворсом из нержавеющей стали 03Х17Н14М2.

**Результаты испытаний.** По результатам исследования структуры и фазового состава сформированных хромовых покрытий выявило присутствие в них аустенита и хрома (таблица 1). При этом количество хрома и никеля в плакированном слое покрытия, сформированном щеткой с ворсом из нержавеющей стали 03Х17Н14М2, по процентному содержанию выше в 5,3 и 9,6 раза соответственно, чем в покрытии, сформированном щеткой с ворсом из стали 65Г (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Химический состав хромовых покрытий, сформированных на поверхностях образцов из стали 45 методом ДПГИ с использованием ВМЩ с ворсом из стали 65Г (1) и нержавеющей стали 03Х17Н14М2 (2)

№ образца		Al	Si	P	S	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Mo	Fe
1	покрытие		0,441	0,06	0,016	0,506	0,556	0,181	0,153	0,02		основ а
	основа	0,132	0,441	0,052	0,017	0,121	0,557	0,185	0,170			основ а
2	покрытие	0,187	0,681	0,074	0,014	2,697	0,66	1,739	0,195		0,015	основ а
	основа	0,101	0,476	0,053	0,002	0,123	0,552	0,181	0,175		0,01	основ а

**Заключение.** Результаты экспериментальных исследований позволяют заключить, что на толщину и структурно-фазовый состав поверхности слоев хромовых покрытий, сформированных методом ДПГИ, существенное влияние оказывает материал проволоочного ворса вращающейся металлической щетки, используемой в качестве гибкого инструмента.

С точки зрения применения технологии ДПГИ для хромирования штоков гидроцилиндров можно сделать следующие выводы:

– при формировании легированных УДАГ хромовых покрытий щетками с проволочным ворсом из углеродистой стали 65Г обеспечивается параметр шероховатости поверхности  $Ra$ , равный 0,25...0,35 мкм, что, согласно многим литературным данным, вполне допустимо. Однако достижимая толщина слоя сформированного покрытия составляет не более 3...5 мкм, что может не обеспечить надлежащий уровень коррозионной стойкости покрытий;

– при использовании щеток с проволочным ворсом из нержавеющей стали 03X17H14M2 толщина слоя составляет 10...12 мкм, а параметра шероховатости поверхности  $Ra$  – 0,8...1,0 мкм. Увеличение толщины слоя и параметра шероховатости поверхности  $Ra$  покрытий, сформированных щёткой из нержавеющей стали 03X17H14M2, вероятно вызвано привнесением частиц материала проволочного ворса в слой покрытия. Об этом свидетельствует повышенное содержание в сформированном слое химических элементов Cr и Ni, входящих в состав материала проволочного ворса щетки.

1. Свешников, В.К. Станочные гидроприводы: Справочник / В.К. Свешников. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.

**УДК 621.793:620.1**

## **КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ЭЛЕКТРОДЕФОРМАЦИОННО ПЛАКИРОВАННЫХ ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ В СОЛЯНОМ ТУМАНЕ**

**Пилипчук Е.В., Шелег В.К., Леванцевич М.А., Кравчук М.А.**

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь.

**Введение.** Несмотря на то, что технологии электролитического хромирования достаточно давно и широко используют в машиностроительном производстве как для улучшения эксплуатационных свойств изделий, так и для восстановления геометрических размеров и формы изношенных деталей, их применение в условиях единичного и мелкосерийного производства не всегда рентабельно, вследствие высоких затрат на электроэнергию и последующую утилизацию токсичных отходов. Это обуславливает необходимость поиска новых, сравнительно недорогих, способов формирования хромовых покрытий в качестве альтернативы гальваническому хромированию.

Сравнительный анализ существующих средств и методов формирования покрытий показывает, что для формирования покрытий на основе хрома вполне может быть использована технология электродеформационного плакирования гибким инструментом (ЭДПГИ), где слой покрытия на поверхности детали формируется из переносимых металлическим ворсом вращающейся щетки

микрочастиц фрикционно взаимодействующего с ним материала покрытия (донора) [1]. Технология отличается экологической чистотой, малой энергоемкостью, простотой реализации и несложностью исполнения необходимых технических средств. Однако отсутствие достаточного количества данных о коррозионной стойкости плакированных хромовых покрытий препятствует принятию решений о целесообразности ее применения и обуславливает необходимость проведения дополнительных исследований.

**Цель исследований** заключалась в сравнительной оценке коррозионной стойкости хромовых покрытий, сформированных методами ЭДПИ и гальванического осаждения в среде соляного тумана.

**Методика исследований.** Для проведения испытаний использовали 6 шлифованных ( $Ra=0,63$  мкм) цилиндрических образцов из стали 45, подвергнутых закалке ТВЧ до твердости 45-50 HRC. При этом образующие поверхности двух образцов покрывались гальваническим хромом, с толщиной слоя 30 мкм, и два образца - подвергали хромированию методом ЭДПИ, с толщиной слоя 12...15 мкм. Два образца оставались без покрытия. Не покрытые торцовые поверхности всех образцов защищались силиконовым герметиком.

В связи с особенностями условий эксплуатации штоков гидроцилиндров, предусматривающих частичную работу хромированной поверхности штока в масляной среде, перед началом испытаний по одному образцу, соответственно, без покрытия, с гальваническим и плакированным хромовым покрытием, погружали в гидравлическое масло с выдержкой 12 часов, после чего извлекали и выдерживали в течение 15 минут до обтекания масла.

Сравнительную оценку коррозионной стойкости хромовых покрытий, сформированных с применением двух технологий, проводили в устройстве соляного тумана, изготовленном на базе бытового увлажнителя воздуха, у которого выходное отверстие, посредством патрубка, соединялось с герметичной емкостью, где располагались испытуемые образцы. Концентрация водно-соляного раствора NaCl, заливаемого в емкость увлажнителя, составляла 10%. Температура окружающего воздуха – 22-23 °C

В качестве критерия оценки коррозионной стойкости принималось время до возникновения первых очагов коррозии. Выявление очагов коррозии осуществляли визуально путем периодического осмотра поверхности образцов через каждые 10 минут после их извлечения из емкости.

**Результаты испытаний.** При анализе результатов исследований было установлено, что образцы с гальваническим хромовым покрытием, независимо от наличия масляной плёнки, выдержали полный срок испытаний без возникновения очагов коррозии. Наименьшими показателями коррозионной стойкости обладали образцы без покрытия, т.к. на образцах с масляной плёнкой и без нее, первые визуально различимые очаги коррозии появились в течение первых 30 и 10 минут соответственно. Коррозионная стойкость образцов с плакированными хромовыми покрытиями составила для образцов с масляной

пленкой и без пленки 50 и 20 минут соответственно, что на 20 минут больше, чем для образцов без покрытия.

**Выводы.** Исходя из результатов проведенных исследований становится очевидным, что хромовые покрытия, сформированные методом ЭДПГИ, имеют более высокую коррозионную стойкость, по сравнению с непокрытыми образцам, однако уступают по этому показателю хромовым покрытиям, полученным гальваническим осаждением, что, возможно, связано со сравнительно меньшей толщиной слоя покрытия, по сравнению с гальваническим. Однако, учитывая более высокую маслостойкость плакированных хромовых покрытий и способность значительно снижать коэффициент трения скольжения в паре с резиновой манжетой их применение для хромирования штоков гидроцилиндров металлорежущих станков вполне может быть оправданным, что подтвердили результаты их эксплуатационных испытаний в производственных условиях ОАО «МЗАЛ им. П.М. Машерова».

1. Оценка применимости технологии электродеформационного плакирования гибким инструментом для хромирования штоков гидроцилиндров / В.К. Шелег, М.А. Леванцевич, Н.Н. Максимченко, Е.В. Пилипчук, Е.Л. Юреть, В.Н. Калач // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 3. – С. 265–271.

**УДК 621.75**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТАНОВЛЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛИ «БАШМАК НАПРАВЛЯЮЩИЙ»**

**Польский Е.А., Абрамов Р.В., Матросова К.А.**

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»,  
г. Брянск, Российская Федерация

В рамках технологической подготовки производства представлены технологические и технические решения по формированию установленных параметров долговечности детали при проектировании схемы установки заготовки, подбора инструмента установленной геометрии и назначения обоснованных режимов резания [1]. С учетом технических требований, определяющих основные ограничения при реализации технологической подготовки производства, всю обработку разобьем на три этапа:

- на первом проведем обдирочную обработку одной стороны башмака и предварительную обработку боковых сторон перед термической обработкой, предназначенной для выравнивания внутренних напряжений;

- на втором этапе проведем обработку основных поверхностей башмака, включая окончательное растачивание основного отверстия, а также подготовим поверхности под заливку баббита;

- третий этап проводим после заливки баббита, на нем обеспечиваем требования по точности и качеству, предъявляемые к поверхности баббита, и получаем конструктивные элементы (пазы и отверстия) на поверхности баббитовой заливки.

Обработку, с учетом снижения затрат на оборудование и производственные площади, предполагается выполнять на одном станке сверлильно-фрезерно-расточном (обрабатывающий центр) с горизонтальным расположением шпинделя. На первой операции заготовку устанавливаем по необработанной поверхности торца основного отверстия – опорные элементы реализующие установочную базу, внутренней поверхности основного отверстия – подпружиненный конический палец, реализующий двойную опорную базу, для базирования по углу поворота обеспечим упор по боковой поверхности башмака – откидной упор, реализующий опорную базу. Такая схема установки позволит определить положение осей симметрии башмака и обеспечить удаление равномерного припуска с боковых и внутренней цилиндрической поверхностей.

Второй операцией технологического процесса вводим термическую обработку для снятия внутренних напряжений (в соответствии с техническими требованиями указанными на чертеже детали п.2). В качестве термической обработки предлагается отжиг 1-го рода.

На второй операции, выполняемой на том же многоцелевом станке с ЧПУ, выполняем обработку основных плоских и внутренних цилиндрических поверхностей, а также обработку вспомогательных гладких и резьбовых отверстий. Для базирования заготовки используется торцовая сторона башмака (пов. А) – опорные пластины, реализующие установочную базу, боковая сторона торца башмака – опорные штыри, реализующие направляющую базу, торец боковой стороны – опорная пластина, реализующая опорную базу. Такое базирование позволит обеспечить техническое требование по перпендикулярности фланца и основной плоскости боковой стороны, а также позволит обработать основное отверстие на проход. Закрепляем заготовку прихватами по противоположной стороне боковой поверхности башмака. За четыре позиции производим обработку торцов основного отверстия и боковых сторон (предварительно и окончательно), обеспечиваем требования по точности и качеству поверхности основного отверстия (за четыре технологических перехода) [2], а также получаем резьбовые и гладкие отверстия (для резьбового за четыре перехода – центрование, сверление, зенкование фаски и нарезание резьбы).

На следующей операции подготавливаем боковые поверхности под нанесение на них слоя антифрикционного материала – баббита. Заготовку базирuem по торцовой поверхности боковых сторон башмака – опорные пластины, реализующие установочную базу, внутренней цилиндрической поверхности основного отверстия – короткий палец, реализующий двойную опорную базу, торцу боковой стороны – опорный штырь, реализующий опорную базу. За два технологических перехода, выполняемых на каждой из

двух позиций обеспечиваем требования по точности (прямолинейность и плоскостность) и качеству (шероховатость) боковых сторон, необходимые для обеспечения прочности соединения баббита и основы.

На последней операции за две позиции обрабатываем поверхность баббита на боковых сторонах, обеспечивая требования по толщине рабочего слоя баббита и параметрам качества поверхности антифрикционного слоя. Кроме этого выполняем пазы специальной формы и отверстия для подачи смазки в зону контакта. Заготовка базируется так же, как и на предыдущей операции механической обработки (плоскость и основное отверстие).

1. Суслов, А.Г. Научноёмкая технология повышения качества сборочных единиц машин на этапах жизненного цикла / А.Г. Суслов, О.Н. Федонин, Е.А. Польский // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2016. – № 5(59). – С. 34-41.
2. Польский, Е.А. Технологическое обеспечение надежности деталей узлов трения наукоемких сборочных единиц / Е.А. Польский, С.В. Сорокин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 4(77). – С. 19-26. – DOI 10.30987/article\_5cb58f4f589ff6.30206728.

**УДК 621.75**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛИ «КОРПУС НАСОСА»**

**Польский Е.А., Воронина И.Д., Ромашенкова А.А.**

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»,  
г. Брянск, Российская Федерация

Одним из основных этапов жизненного цикла изделия является проектирование этапов изменения и последующего определения состояния предмета производства. На этом этапе необходимо согласовать требования по точности и качеству поверхностей, а также технические требования по месторасположению отдельных конструктивных элементов детали, указанные в чертеже, с методами и режимами механической обработки для их обеспечения. Кроме этого требуется учесть достигаемые параметры механических свойств детали с учетом условий эксплуатации и показателей надежности узла и машины в целом [1].

Для формирования параметров точности и шероховатости поверхности предполагаем выполнять обработку на станке сверлильно-фрезерно-расточной группы (обрабатывающий центр). В качестве технологических баз используются необработанная наружная цилиндрическая поверхность  $\varnothing 240$  и  $\varnothing 216$  - призмы (4 степени свободы) и «черная» наружная цилиндрическая

поверхность бобышки  $\varnothing 70$  – призма (две степени свободы). Такая схема установки позволит обеспечить равномерное распределение припуска на механическую обработку по внутренним цилиндрическим поверхностям и совпадение оси симметрии заготовки с поверхностями от которых на конструкторском чертеже проставлены размеры, т.е. реализуется принцип совмещения баз, позволяющий исключить перерасчет технологических размеров. На этой операции производим обработку торцов (двух- и трехкратное фрезерование с учетом достижения установленных параметров Ra) [2], а также обработку внутренних цилиндрических поверхностей. При получении резьбовых отверстий их обработку разбиваем на четыре перехода (центрирование для предотвращения увода сверла, сверление сверлом диаметром равным внутреннему диаметру резьбы, зенкование заборной фаски для придания направления резьбонарезному инструменту - метчику и нарезание резьбы машинным метчиком).

На второй операции заготовку устанавливаем по одному из торцов как установочной базе – опорные пластины (три степени свободы), по внутренней цилиндрической поверхности  $\varnothing 168H7$  – короткий палец (две степени свободы) и по углу поворота по наружной радиусной поверхности  $\varnothing 70$  – подпружиненная призма (одна степень свободы). Основной особенностью получения внутренней резьбы большого диаметра – М48 является применение способа резьбофрезерования фрезой с пластиной из твердого сплава. Этот способ является наиболее производительным и, с учетом получения полного профиля резьбы в «глухом» отверстии, единственно возможным при использовании оборудования с ЧПУ.

Операция растачивания предполагает обработку отверстий, полученных на предварительных этапах, с целью увеличения диаметра или получения требуемых результатов по точности и качеству поверхности.

Черновое растачивание – обработка предварительно сформированного отверстия. Высокопроизводительный метод, зачастую предполагающий последующую обработку отверстия (рис. 1, а). Точность отверстия по IT9 включительно.

Чистовое растачивание – обработка отверстий в размер и с обеспечением требований по качеству поверхности. Небольшие глубины резания, как правило, не превышающие 0.5 мм. Точность отверстий лежит в пределах IT6-IT8.

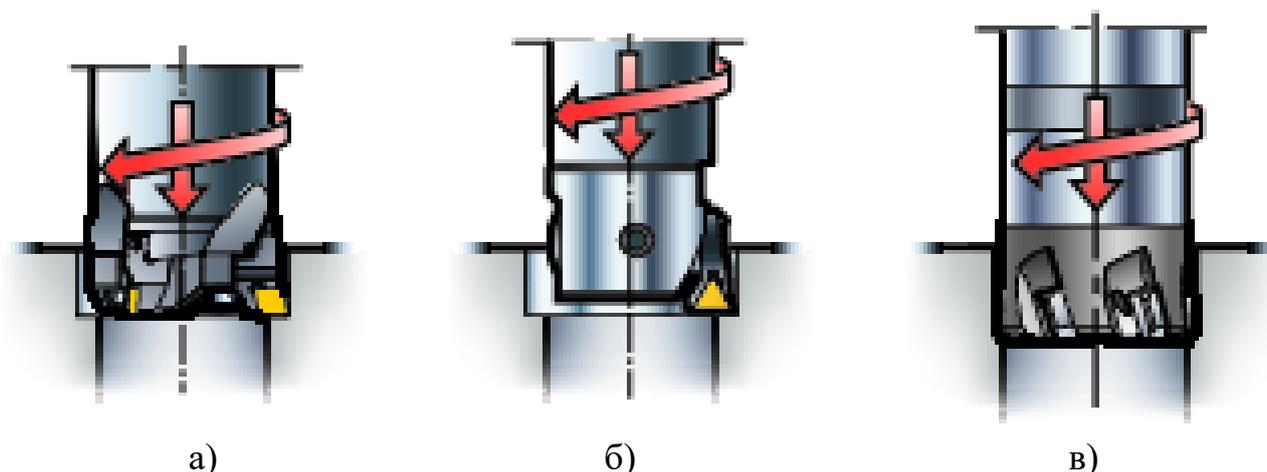


Рис. 1 – Схема обработки основного отверстия

а) – черновое растачивание, б) чистовое растачивание, в) развертывание

Изгибная прочность и передаваемый крутящий момент являются ключевыми факторами при выборе системы крепления расточного инструмента. Для получения отверстия высокого качества и обеспечения стабильности процесса резания мы рекомендуем использовать инструмент с соединением Coromant Capto и прецизионные патроны CoroGrip и HydroGrip.

1. Польский, Е. А. Технологическое обеспечение точности и качества поверхностей деталей машин при проектировании маршрутно-операционного технологического процесса методом синтеза на основе анализа размерных связей / Е. А. Польский // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – № 10(64). – С. 39-48.
2. Pol'skii, E. A. Improvements in surface precision by automated design of machining trajectories / E. A. Pol'skii // Russian Engineering Research. – 2017. – Vol. 37. – No 5. – P. 455-458. – DOI 10.3103/S1068798X17050185.

УДК 621.91.02

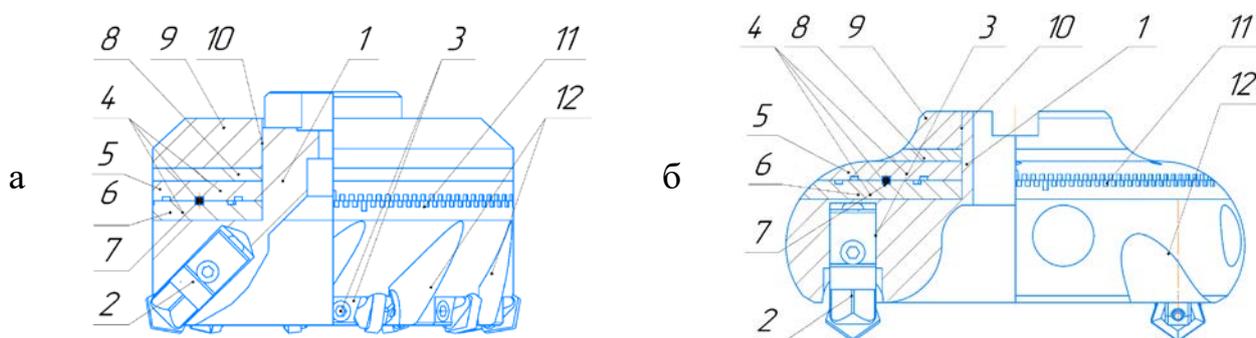
## СИСТЕМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЛОЧНО-МОДУЛЬНЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Попок Н.Н., Портянко С.А., Гвоздь Г.И., Тихон Е.М., Бабашинский М.А.  
Полоцкий государственный университет, Республика Беларусь

Разработанная система проектирования различных типов режущих инструментов (токарных резцов, расточных инструментов и фрез) основывается на модульном принципе, предусматривающем использование в конструкциях унифицированного блока резцового, корпусах, зажимных, переходных и балансировочных модулей, а также моделированием конструкций из пластиковых материалов с использованием 3D-печати. Это позволяет сократить

затраты на проектирование и изготовление режущих инструментов, так и на их эксплуатацию.

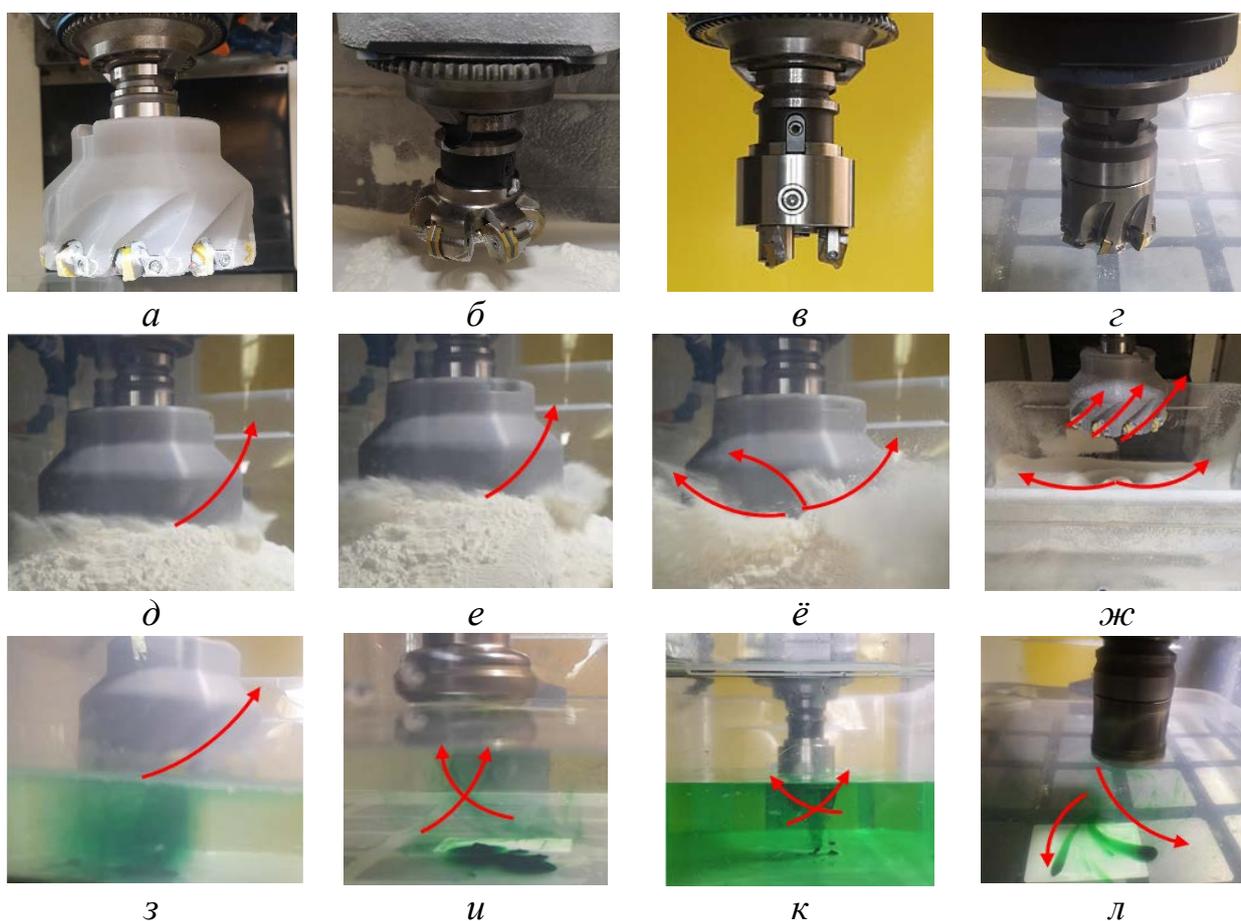
С применением 3D-принтера Mass Portal Pharaoh XD 30 были отпечатаны модельные детали резцовых блоков, фрез и расточных инструментов из различных пластиковых материалов. В конструкциях режущих инструментов используются ранее полученные результаты исследований по выполнению наружных поверхностей корпусов обтекаемыми в виде сопрягаемых торцов, стружкоотводящих канавок на торце и периферии фрез под углами  $35\text{--}55^\circ$  по отношению к оси вращения, учитывающих базирующие поверхности и размеров отверстий для установки запатентованной конструкции балансировочного модуля в виде колец со спиральными канавками и шариком-грузиком. На рисунке 1 показаны эскизы исполнения вариантов усовершенствованной конструкции фрезы и расточного патрона.



1 – модуль корпусной; 2 – блок резцовый; 3 – модуль зажимной;  
 4 – модуль балансировочный; 5 – верхнее кольцо; 6 – нижнее кольцо;  
 7 – грузик; 8 – тарельчатая шайба; 9 – фланец; 10 – микрометрическая резьба;  
 11 – микрометрическая шкала; 12 – стружко-потокоотводящие канавки  
 Рисунок 1 – Эскизы сборных торцовых фрез с модулем балансировочным:  
 а – разработанная; б – усовершенствованная

Наряду с изготовлением режущих инструментов из пластиковых материалов были изготовлены конструкции из металла. Для проверки работоспособности инструментов проведено моделирование процесса резания с использованием жидкости (подкрашенной воды) и сыпучей среды (муки) при высокой частоте вращения инструмента (до  $10\text{ тыс. мин}^{-1}$ ). Установлено направление потоков среды, обеспечивающая ее применение к поверхностям корпуса и стружкоотводящих канавок (рисунок 2), что гарантирует эффективный отвод теплоты из зоны резания.

Предлагаемая система блочно-модульных режущих инструментов рекомендуется для использования вспомогательными и ремонтными службами машиностроительных предприятий.



а – макет сборной торцевой фрезы из пластикового материала; б – сборная торцевая фреза «Seiko»; в – разработанная сборная торцевая фреза из металлического материала; г – сборная торцевая фреза «Iscar»; д–ж – распределение потоков в сыпучей среде; (з–л) распределение потоков в жидкой среде

Рисунок 2 – Фрагменты моделирования работы сборных торцевых фрез в жидкой и сыпучей средах

1. Попок, Н.Н. Моделирование и регулирование стружкообразования и потоков смазочно-охлаждающей технологической среды при фрезеровании / Н.Н. Попок, С.А. Портянко, Е.М. Тихон, В.С. Анисимов // Вестн. БарГУ. Сер. Технические науки. – 2021. – № 1 (9). – С. 27–36.

УДК 891.5; 004.925.84:621; 994.93

**АКТУАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ  
 КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ  
 ПРОИЗВОДСТВА НА МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ И  
 МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ РЕСПУБЛИКИ**

**Савицкий В. В.<sup>1</sup>, Савицкий И.В.<sup>2</sup>**

- 1) Витебский государственный технологический университет  
Витебск, Республика Беларусь
- 2) Компания «Гросвер»,  
Минск, Республика Беларусь

Вопросам цифровизации производственных процессов в республике в последнее время уделяется достаточно много внимания. В рамках внедрения цифровых технологий производства на белорусских промышленных предприятиях с целью обеспечения конкурентоспособности в условиях четвертой промышленной революции на базе ОАО «ЦНИИТУ» при поддержке Министерства промышленности Республики Беларусь создан «Центр компетенции цифровой трансформации промышленности Республики Беларусь», который ведёт выполнение НИОКР «Разработать и внедрить интеллектуальную систему конструкторско-технологического проектирования и подготовки производства изделий с использованием цифровых технологий» по внедрению решений на базе Teamcenter и NX от Siemens PLM Software [1].

Работы в России по аналогичному направлению начаты с принятия стратегия цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности [2–3].

Активное внедрение компьютерной техники и технологий в производственные процессы в конце 20 века привело к ускоренному развитию практически всех отраслей мировой экономики, включая машиностроение и станкостроение. С 90-х годов наблюдается интеграция CAD/CAM/CAE-систем с системами управления проектными данными PDM и с другими средствами информационной поддержки изделий. Благодаря их внедрению получили широкое развитие и применение программные продукты, которые позволили ускорить производственные процессы, включая подготовку конструкторской и технологической документации для выпуска изделий. Вместе с появлением новых поколений обрабатывающих станков с ЧПУ новый импульс получила металлообработка.

Многогранность инженерной деятельности предполагает широкое использование возможностей компьютерных технологий в различных направлениях машиностроительного производства – в проектировании, выполнении расчётов конструкций деталей и узлов, разработке технологических процессов, подготовке производства к выпуску продукции и т. д. Применение высокопроизводительных систем автоматизированного проектирования, технологической подготовки производства, инженерного анализа, систем управления проектными и другими данными стало ключевым элементом развития бизнеса любого предприятия, работающего на современном рынке машиностроения. Внедрение станков с ЧПУ обеспечило развитие автоматизации в рамках машиностроительных предприятий серийного и мелкосерийного производства.

В станках с ЧПУ сочетается гибкость универсального оборудования с точностью и производительностью станка-автомата. В результате внедрения

таких станков происходит значительное повышение производительности труда, создаются условия для многостаночного обслуживания. Подготовка производства в этом случае переносится в сферу инженерного труда, сокращаются её сроки, упрощается переход на новый вид изделия вследствие заблаговременной подготовки программы выпуска, что имеет решающее значение в условиях рыночной экономики.

Технический прогресс отчасти затронул машиностроительные и станкостроительные предприятия республики. Так, на Минском тракторном заводе дан старт внедрению цифровой системы проектирования и подготовки производства [4]. Главная задача цифровой трансформации на предприятии – повысить эффективность и конкурентоспособность завода для того, чтобы он мог получать максимальную прибыль. Суть проекта – цифровизация всего производственного цикла. Предполагается бизнес-процессы конструкторско-технологических и производственных служб завода перевести в одну цифровую среду, в которой источником данных и подлинником станет 3D-модель, хранящаяся в системе. Чертежей в том виде и понимании, к которым привыкли на предприятиях, больше не будет.

Однако на большинстве предприятий передовые компьютерные технологии и оборудование с ЧПУ внедряются крайне медленно. Пусть и приобретаются высокопроизводительные станки с ЧПУ известных станкостроительных фирм – DMG MORI, Mazak, Micron, Haas и др. для основного производства, листопробивное оборудование с ЧПУ – для холодноштамповочного, плазменная, лазерная, гидроабразивная резка – для заготовительного, однако их использование в технологическом процессе изготовления деталей основано на применении знаний операторов таких станков, имеющих навыки программирования обработки, в основном, со стойки ЧПУ. При этом следует учитывать, что программирование даже трёхкоординатной обработки с помощью функциональных клавиш на панели оператора требует слишком больших затрат времени, а программирование четырёх- и, тем более, пятикоординатной обработки, в большинстве случаев невыполнимо. Несколько более совершенным подходом можно считать дополнительное оснащение оборудования с ЧПУ рядом расположенными персональными компьютерами, которые соединены друг с другом с помощью сетевого подключения. На таких компьютерах установлено программное обеспечение, обеспечивающее автоматизацию процесса создания управляющих программ. Однако оба подхода в промышленно развитых странах давно признаны неэффективными, поскольку во время программирования обработки станок чаще всего простаивает, а, учитывая стоимость станкочаса его работы, это приводит к огромным непроизводительным затратам. К ним добавляются расходы на заработную плату оператора-станочника станка, которую руководству предприятия приходится выплачивать за совмещение профессий. Так, согласно вакансий, объявляемых предприятиями республики различного профиля, оператор-станочник со знанием программирования может рассчитывать на заработную плату 2000–2400 руб. и более, в то время как

инженер-технолог – 800–1400 руб. и, в основном, за оформление в бумажном виде технологических процессов изготовления деталей.

Отдельно следует отметить тот факт, что в большинстве случаев приобретаемое оборудование поступает на предприятия недостаточно укомплектованным, отсутствуют, например, такие важные элементы станков, как системы контактного позиционирования деталей, контактного и бесконтактного определения размеров инструментов, которые при рациональном их использовании обеспечивают значительную экономию времени как перед обработкой заготовки, так и в процессе изготовления детали и контроля её размеров.

Программирование обработки на передовых предприятиях стало областью инженерного труда, а работа оператора-станочника и наладчика, обслуживающих станки с ЧПУ, в этом случае существенно упрощается и сводится к наладке инструментов в соответствии с их использованием в программах обработки конкретных заготовок, установке приспособления, инструментов в инструментальный магазин, занесению их параметров в таблицу инструментов, запись нулевых точек в соответствующую таблицу в соответствии с картами наладки, в установке и закреплении заготовки в рабочем пространстве станка, запуске управляющей программы обработки и снятии детали после обработки, проверке точности обработки.

Для повышения эффективности использования оборудования и внедрения современных компьютерных технологий не только в конструкторскую, но и в технологическую подготовку производства на предприятиях машиностроительного комплекса программирование обработки следует перенести в технологические или конструкторско-технологические подразделения, которые оснащены соответствующим образом как программно, так и технически. При этом рабочее место технолога-программиста должно включать высокоинтеллектуальное программное обеспечение, которое оснащено средствами визуализации обработки и возможностью включения в этот режим не только симуляции, но и верификации обработки с использованием виртуального станка с его кинематикой, приспособлениями для установки и закрепления заготовок, инструментами. С помощью таких средств на экране монитора технолог-программист может проследить весь процесс обработки и, при необходимости, внести в него соответствующие коррективы ещё до запуска процесса обработки реальной заготовки на станке. Это потребует на первом этапе приобретения соответствующих комплексных продуктов, включающих CAD/CAM, с помощью которых можно выполнять не только конструкторские разработки, но и использовать их в технологической подготовке при создании управляющих программ для станков с ЧПУ, а также выпускать полный комплект конструкторской и технологической документации на любое изделие с учётом требований действующих стандартов ЕСКД и ЕСТД. Причём наличие в САМ конструкторского ядра обязательно из-за необходимости модификации некоторых элементов конструкторской модели в соответствии с технологией её обработки. Особенно важно применение таких

систем при написании программ обработки сложных деталей, изготавливаемых на станках с ЧПУ в 3-5-тикоординатном исполнении, с большим количеством операций и переходов в операциях, выполняемых при минимально возможном количестве установов.

Процесс конструкторской и технологической подготовки к выпуску продукции может быть реализован следующим образом. Вначале с помощью CAD любого уровня (SolidWorks, CATIA, NX, PTC Creo, Autodesk Inventor, КОМПАС-3D и др.) инженеры-конструкторы создают электронную геометрическую модель детали. Копия этой модели передаётся технологу, который загружает её в САМ-систему. Задача программиста-технолога заключается в выборе заготовки детали, составлении технологической последовательности обработки (с определением количества установов и разработке маршрутной или операционной технологии), подборе режущих инструментов для выполнения этой последовательности, расчёте режимов резания, выборе приспособлений для установки заготовок и программировании траектории движения рабочих органов из предлагаемых САМ-системой вариантов обработки. Кроме этого, появляется возможность внедрения в процесс обработки детали программ, обеспечивающих выполнение измерительных циклов, которые реализуются системами контактного или бесконтактного контроля положения заготовок и размеров деталей, качества обработанных поверхностей, размеров и состояния инструментов (от Renishaw, Heidehain, Blum и др.). В этом случае станок превращается ещё и в контрольно-измерительную машину, обеспечивающую получение на готовой детали гарантированной размерной точности и шероховатости после обработки. Выполнение контроля инструментов в процессе выполнения обработки гарантирует не только их работоспособность, но и обеспечивает своевременную замену при поломке либо износе, превышающем допустимый для данного инструмента. Благодаря перечисленным особенностям организации процесса создаются предпосылки для реализации адаптивного характера обработки.

Главным элементом такой подготовки производства и её реализации на всех этапах станут геометрические модели деталей вместо их рабочих чертежей. Такая необходимость вызвана тем, что информативность 3D-модели с её атрибутами и техническими требованиями намного выше, чем информация о детали с плоского чертежа. Причём эта информация используется затем в разработке операционной технологии за счёт возможности САМ-системы анализировать графические данные о детали в своём алгоритме работы и автоматическом составлении последовательности переходов по обработке определённых геометрических элементов будущей детали. Так, если в атрибутах элемента модели, например, отверстия не содержатся данные о размерной точности, выраженной в виде допуска на размер в буквенно-цифровом или цифровом выражении, то в операционной технологии, созданной в САМ, будут сформированы операционные переходы центrovания и сверления. При наличии резьбы в отверстиях к таким переходам автоматически

добавится обработка резьбы метчиком или резьбовой фрезой. В случае указания в 3D-модели детали допуска на диаметр отверстия, например, H7 система предложит в качестве вариантов обработки такой поверхности в зависимости от её диаметра кроме центрования и сверления рассверливание, зенкерование и развёртывание, или другой набор переходов – центрование, сверление, рассверливание, растачивание. Причём для каждого случая будут автоматически сформированы циклы обработки, выбраны инструменты и по умолчанию предложены элементы режима резания. В ряде САМ-систем высокого уровня, например, NX от Siemens Software PLM, такие возможности называют обработкой на основе элементов.

Реализация концепции конструкторско-технологической подготовки производства на основе геометрической модели детали (3D-модели) позволяет в последующем сформировать в электронном виде полный набор технологической документации (маршрутные карты, карты эскизов, карты наладки станка и инструментов, рабочие инструкции и пр.) и, при необходимости, опубликовать их.

Вариант конструкторско-технологической подготовки, предложенный выше, можно считать начальным этапом дальнейшего внедрения компьютерных технологий в производственные процессы машиностроительных предприятий. Решение некоторых вопросов планирования технологической подготовки производства с САМ совместно обеспечивает использование САPP-систем.

Дальнейшее развитие цифрового предприятия предполагает внедрение PDM-системы (англ. Product Data Management), которая обеспечивает управление всей информацией об изделии. В PDM-системах обобщены такие технологии, как управление инженерными данными и документами, управление информацией об изделии, управление техническими данными, управление технической информацией, управление изображениями и манипулирование информацией, которая полностью и однозначно определяет конкретное изделие. Благодаря таким возможностям реализуется взаимодействие конструкторско-технологических подразделений со всеми структурными подразделениями предприятия.

Окончательным этапом цифровизации, которая обеспечивает автоматизацию производственных процессов не только в рамках предприятия, но и всех его взаимоотношений с внешними потребителями продукции в течение жизненного цикла её существования, должна стать разработка и внедрение PLM-системы. Планирование деятельности с учётом особенностей стадий и этапов жизненного цикла позволит уменьшить издержки, рационально спланировать работы на разных стадиях жизненного цикла изделий. Управление процессами жизненного цикла современного высокотехнологичного изделия является весьма сложной задачей и решается с помощью специализированных технологий и автоматизированных систем управления жизненным циклом. К числу таких высокоразвитых систем следует

отнести, кроме упомянутой выше Teamcenter® от Siemens Software PLM, PLM-решение V6 от компании Dassault Systemes, Windchill® от компании PTC.

К благоприятным факторам цифровизации следует отнести то, что элементы САПР конструкторско-технологической подготовки производства в том или ином виде уже имеются на многих машиностроительных предприятиях. Системы PDM практически не распространены. Что касается полного цикла автоматизации, то в отечественной промышленности они также не встречаются.

Решение задач цифровизации необходимо осуществлять совместными усилиями коллективов производственных предприятий, поставщиков программных продуктов и учебных заведений, которые должны обеспечить подготовку специалистов соответствующей квалификации для машиностроительных отраслей.

1. ЦНИИТУ : Центр компетенций цифровой трансформации промышленности Республики Беларусь [Электронный ресурс]; 2022. – URL: <https://cniitu.by/about/history/bylo-sozdano-up-tsniitu-it-v-tselyakh-vstupleniya-v-pvt/> (дата обращения 04.02.22).
2. Экономические эффекты от цифровизации и внедрения IoT в машиностроении в России / JSON.TV [Электронный ресурс] ; 2022. – URL: [https://json.tv/ict\\_telecom\\_analytics\\_view/ekonomicheskie-effekty-ot-tsifrovizatsii-i-vnedreniya-iot-v-mashinostroenii-v-rossii-20180817013305](https://json.tv/ict_telecom_analytics_view/ekonomicheskie-effekty-ot-tsifrovizatsii-i-vnedreniya-iot-v-mashinostroenii-v-rossii-20180817013305) (дата обращения 04.02.2022).
3. Стратегия цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности в целях достижения их "цифровой зрелости" до 2024 года и на период до 2030 года / ГАРАНТ.РУ [Электронный ресурс] ; 2022. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/401415210/> (дата обращения 04.02.2022).
4. МТЗ цифровизирует производство : БелТА. Экономика [Электронный ресурс] ; 2022. – URL: <https://www.belta.by/economics/view/mtz-tsifroviziruet-proizvodstvo-470582-2021/> (дата обращения 05.02.2022).

**УДК 621.723+667.64**

## **ПРОЦЕСС КОМБИНИРОВАННОЙ ОЧИСТКИ-ПОЛИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ В РЕМОНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

**Синькевич Ю.В.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Очистка деталей от различных загрязнений является специфической операцией ремонтного производства. От полноты и качества ее проведения

зависят культура производства, производительность труда, эффективность использования оборудования и, в конечном итоге, надежность и долговечность работы отремонтированных деталей и узлов. Организация и технология моечно-очистных работ зависят от типа производства, производственной программы, вида загрязнений, подлежащих удалению, и объектов мойки. Опыт работы ремонтных предприятий показывает, что наиболее рациональной формой организации моечно-очистных работ является многостадийная мойка с использованием специальных способов очистки ответственных деталей [1].

Электроимпульсное полирование (ЭИП) широко используется для подготовки поверхности металлических изделий перед нанесением гальванических и тонкопленочных вакуумно-плазменных покрытий. Возможность применения ЭИП в технологических процессах очистки поверхности деталей изучалась на примере очистки от нагара клапанов двигателя внутреннего сгорания мобильной техники. Известные методы очистки от нагара (механические, химические, термохимические и комбинированные) имеют ряд недостатков: требуют применения ручного труда во вредных условиях, имеют невысокую производительность и качество очистки и могут оказывать негативное влияние на физико-химические свойства поверхностного слоя металла [1]. Кроме того, клапаны двигателей внутреннего сгорания после очистки от нагара для обеспечения заданного качества поверхности в большинстве случаев дополнительно механически полируют. При оценке возможности и качества совмещенного процесса очистки-полирования методом ЭИП в качестве критериев были приняты следующие:

- за время обработки клапан должен быть полностью очищен от нагара;
- диаметр пальца клапана должен находиться в пределах поля допуска на размер;
- параметр шероховатости поверхности  $Ra$  пальца клапана не должен превышать 1,25 мкм.

На первом этапе исследований обработка клапанов проводилась в 2,5%-ном водном растворе хлорида аммония в течение 5 мин при напряжении обработки 280 В и температуре электролита 90°C. Толщина нагара на шейках клапанов находилась в пределах от 1 до 5 мм (клапан, расположенный слева на рисунке). В этом случае не удалось обеспечить полного удаления нагара. На поверхности шейки клапанов оставалось кольцо нагара шириной до 5 мм. При этом съем металла на сторону на пальце клапана составил 20–25 мкм.



Рисунок 1 – Внешний вид клапана двигателя внутреннего сгорания до (слева) и после обработки (справа) комбинированным методом очистки-полирования

На втором этапе исследований в состав электролита была дополнительно введена композиция Обезжириватель НТ-М(А) ТУ РБ 100200832.001-2003. Нагар на шейках клапанов удалить полностью также не удалось. При этом оставшееся на шейках клапанов кольцо нагара приобрело нехарактерный металлический оттенок, съем металла на сторону превысил 50 мкм и диаметр пальца клапана после обработки вышел за нижнюю границу поля допуска на размер. В ходе дальнейших экспериментов было установлено, что повышение напряжения обработки до 380 В обеспечивает полное удаление нагара с поверхности клапанов при обработке в различных по составу электролитах. При этом достигался уровень шероховатости поверхности пальца клапана ниже допустимого, а диаметр пальца клапана находился в пределах поля допуска на размер.

Следует отметить, что при использовании ЭИП в качестве операции очистки возникает ряд трудностей. Так, достаточно сложно определить необходимую продолжительность обработки, т.к. она зависит от толщины и вида загрязнений. В процессе обработки происходит быстрое загрязнение электролита продуктами очистки, что требует более частой его замены или регенерации.

В результате дальнейших исследований было установлено, что наиболее целесообразным методом очистки является комбинированный процесс очистки-полирования, включающий дополнительную операцию химического обезжиривания, предшествующую операции ЭИП и предназначенную для частичного разрыхления нагара и удаления нефтяных загрязнений с поверхности клапанов. Это позволило снизить трудоемкость операции ЭИП и повысить работоспособность раствора электролита. Установлено, что по производительности и качеству обработки оптимальным составом раствора для химического обезжиривания является водный раствор гидроксида натрия и композиции Обезжириватель НТ-М(А) при концентрациях 35–45 г/л и 10–40 г/л соответственно, который позволяет проводить химическое обезжиривание поверхности деталей погружным или струйным методом с последующей

промывкой деталей в проточной воде. Продолжительность химического обезжиривания клапанов двигателя внутреннего сгорания зависит от степени загрязнения поверхности и температуры раствора и составляет от 5 до 60 мин. Разработанная технология комбинированной очистки-полирования позволила полностью удалить нагар с шейки клапанов и снизить шероховатость поверхности пальца клапанов до более низкого значения, чем уровень, регламентированный конструкторско-технологической документацией. На рисунке (справа) представлен клапан, обработанный по разработанной технологии.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о перспективности применения метода ЭИП в технологических процессах комбинированной очистки-полирования деталей в ремонтном производстве при наличии на обрабатываемой поверхности загрязнений значительной толщины.

1. Справочник технолога авторемонтного производства. Под ред. Г.А. Малышева. – М.: Транспорт, 1977. – 430 с.

**УДК 621.79.024.4**

## **ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ И ОБЕЗЖИРИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ**

**Синькевич Ю.В.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Известно большое количество составов растворов для химического обезжиривания поверхности заготовок из черных и цветных металлов и сплавов [1, 2], в том числе составы, регламентированные ГОСТ 9.305-84. Однако существенным недостатком известных растворов является высокая рабочая температура их применения, равная 50–80°C. В результате проведенных исследований по выбору и оптимизации состава раствора для химического обезжиривания заготовок перед операцией электроимпульсного полирования установлена перспективность применения разработанного процесса в качестве основной операции технологических процессов очистки поверхности деталей и узлов от различных загрязнений, а также для обезжиривания поверхности при подготовке деталей под нанесение различных функциональных покрытий (гальванических, лакокрасочных и других). На основе полученных данных разработана композиция Обезжириватель НТ-М в трех модификациях (А, Б и В), а также разработаны и утверждены ТУ РБ 100200832.001-2003. Композиция

Обезжириватель НТ-М является основным компонентом водных растворов для химической очистки и химического или электрохимического обезжиривания поверхности заготовок при температуре растворов от +5 °С, биоразлагаема в окружающей среде и по воздействию на организм человека согласно ГОСТ 12.1.007-76 относится к IV классу опасности (малоопасное вещество).

На этапе разработки технологий химической очистки и химического обезжиривания оценивалась эффективность применения поверхностно-активных веществ ионогенного и неионогенного типов ОП-7, ОП-10, НП-1, НП-3, ДС-РАС и ОС-20, а также композиций на их основе: Лабомид-203, ТМС-31, МС-6, Деталин и Обезжириватель ДХТИ-НТ. При подборе веществ для химической очистки и обезжиривания струйным и погружным методами исследовались композиции, способные устойчиво работать в слабощелочной среде с рН 8–9. Введение поверхностно-активных веществ в водные щелочные растворы усиливает эмульгирующее действие раствора, снижает поверхностное натяжение на границе раздела фаз раствор–жир и раствор–металл и обеспечивает образование мицеллосложных комплексов, состоящих из большего числа молекул и ионов, которые формируются при диспергировании фазы или при возникновении новой фазы в процессе ее конденсации из молекул и ионов. Поверхностно-активные вещества благодаря процессу мицеллообразования способствуют диспергированию твердых и эмульгированию жидких загрязнений и создают благоприятные условия для быстрого и эффективного удаления жировых и некоторых других видов загрязнений.

В ходе испытаний качество обезжиривания поверхности образцов из стали 10 контролировалось по краевому углу смачивания пленкой воды и методом нанесения контактной меди из водного раствора, содержащего 120 г/л медного купороса, 80 г/л серной кислоты и 0,5 г/л хлорида натрия. В результате проведения серии экспериментов по очистке струйным методом поверхности стальных деталей от смеси масла И-20 и солидола в соотношении 1:1 установлено, что моющая способность водных растворов известных моющих средств при температуре раствора 18–25°С значительно хуже по сравнению с раствором, содержащим композицию Обезжириватель НТ-М(Б) (таблица).

Таблица – Моющая способность моющих средств при T=20°С и P=0,1 МПа

Наименование моющего средства	Концентрация в водном растворе, г/л	Продолжительность обработки, с			
		60	120	180	240
		Чистота поверхности, балл			
Тринатрийфосфат	20	3,0	4,5	5,0	5,5
Лабомид-203	30	3,5	5,0	5,5	6,0
МС-6	30	3,5	5,0	5,5	6,0
Обезжириватель ДХТИ-НТ	30	4,0	5,0	5,5	6,0
Обезжириватель НТ-М(Б)	30	6,0	8,0	9,0	10,0

С учетом полученных данных исследование процесса химического обезжиривания поверхности стальных деталей с целью подготовки деталей к нанесению функциональных покрытий проводилось в водном растворе, содержащем 20 г/л тринатрийфосфата и 30 г/л композиции Обезжириватель НТ-М(Б). После струйной обработки в течение 4 мин при температуре раствора 20°С образцы из стали 10 подвергались химическому травлению в течение 1–2 мин в 20%-ном водном растворе серной кислоты, промывке и нанесению медного, цинкового и никелевого гальванических покрытий с рядом толщин, регламентированных ГОСТ 9.303-84. После осаждения покрытий и сушки контролировалась прочность сцепления покрытий с металлической подложкой по методикам, рекомендованным ГОСТ 9.302-88. Все образцы выдержали испытания, что свидетельствует о высокой степени очистки поверхности перед гальванизацией.

Высокая эффективность удаления масляных и иных загрязнений в водных растворах, содержащих композицию Обезжириватель НТ-М, обусловлена сильными адсорбционными свойствами композиции на поверхности металлической подложки и активным мицеллообразованием с масляной фазой загрязнений, что подтверждается отсутствием вторичного осаждения масляных загрязнений на поверхности деталей при их извлечении из ванны через слой пены.

В качестве примера применения разработанной технологии химической очистки поверхности деталей и узлов от загрязнений значительной толщины на рис. 1 представлен внешний вид торцевых уплотнений, используемых в установках для крекинга нефти.



Рис. 1 – Внешний вид торцевых уплотнений и фрагментов сильфона соответственно до (а; б) и после химической очистки (в; г)

Очистка уплотнений проводилась в водном растворе гидроксида натрия и композиции Обезжириватель НТ-М(А) при концентрациях соответственно 35–45 г/л и 10–40 г/л в течение 15 мин и температуре раствора 20°С. Технология химической очистки деталей и узлов оборудования для крекинга нефти внедрена в ремонтном производстве ОАО «Мозырский НПЗ».

В качестве второго примера на рис. 2 представлен внешний вид камеры сгорания котла подогревателя танка Т-72Б до и после химической очистки при температуре раствора 20°С.



Рис. 2. Внешний вид камеры сгорания котла подогревателя танка Т-72Б до (а) и после (б) химической очистки

Разработанные технологии химического обезжиривания поверхности деталей перед нанесением функциональных покрытий внедрены более чем на 50 предприятиях Республики Беларусь, в том числе ОАО «Амкодор», ОАО «ММЗ имени С.И. Вавилова-управляющая компания холдинга «БелОМО», ОАО «ТАиМ», ОАО «Гомсельмаш» и других.

1. Кудрявцев, Н.Т. Электролитические покрытия металлами / Н.Т. Кудрявцев. – М.: Химия, 1979. – 352 с.
2. Гальванотехника: справ. изд. / Ф.Ф. Ажогин [и др.]. – М.: Металлургия, 1987. – 736 с.

**УДК 004.414**

## **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ГРАФИЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАНИРОВОК РАБОЧИХ МЕСТ**

**Сорокин С.В., Абрамов Е.А., Баранова Е.А.**

Брянский государственный технический университет Брянск,  
Российская Федерация

В условиях активной конкуренции особую остроту для машиностроительных заводов приобретает проблема регулярного обновления продукции, выпуска новых модификаций уже разработанных изделий с тем, чтобы удовлетворить запросы максимального числа потребителей.

В состав современных систем автоматизированного проектирования входят модули проектирования планировок цехов. Эти подсистемы не всегда входят в базовую комплектацию CAD/CAM систем, а некоторые просто отсутствуют. Поэтому актуальной является задача по разработке графической библиотеки элементов планировок цехов [1, 2].

Графическая библиотека используется для условий серийного производства с применением средств САПР. Она позволяет сократить время, затрачиваемое конструкторами на проектирование плана участка механического цеха, за счет применения средств автоматизированного проектирования. Так же позволяет автоматически задавать параметры (габариты) станков, выбирать из графической библиотеки необходимые конструкции крыш, колонн, подъемно-транспортное оборудование.

Данная графическая библиотека элементов планировок цехов предназначена для проектирования планировок цехов конструкторскими бюро с непосредственным согласованием основных данных (какое технологическое оборудование применяется в том или ином технологическом процессе и т.п.) с отделом главного технолога. Таким образом, основными пользователями являются конструкторы машиностроительного предприятия.

Разработанная библиотека элементов планировок имеет следующие функциональные возможности (рис. 1):

- возможность получения планировок с расположением станков в 1 или 2 ряда относительно главного магистрального проезда;
- возможность размещения нужного количества единиц технологического оборудования;
- получения необходимого количества пролетов здания;
- установка нужных значений основных параметров, характеризующих здание цеха ( $L$  - ширина пролета,  $t$  – шаг колонн,  $H$  - высота пролета);
- возможность выбора положения дополнительных элементов (мест расположения заготовок и готовых деталей);
- возможность установки технологического оборудования под углом, продольно и поперечно по отношению к проезду, и фронтом, «в затылок» и тыльными сторонами по отношению друг к другу и др.

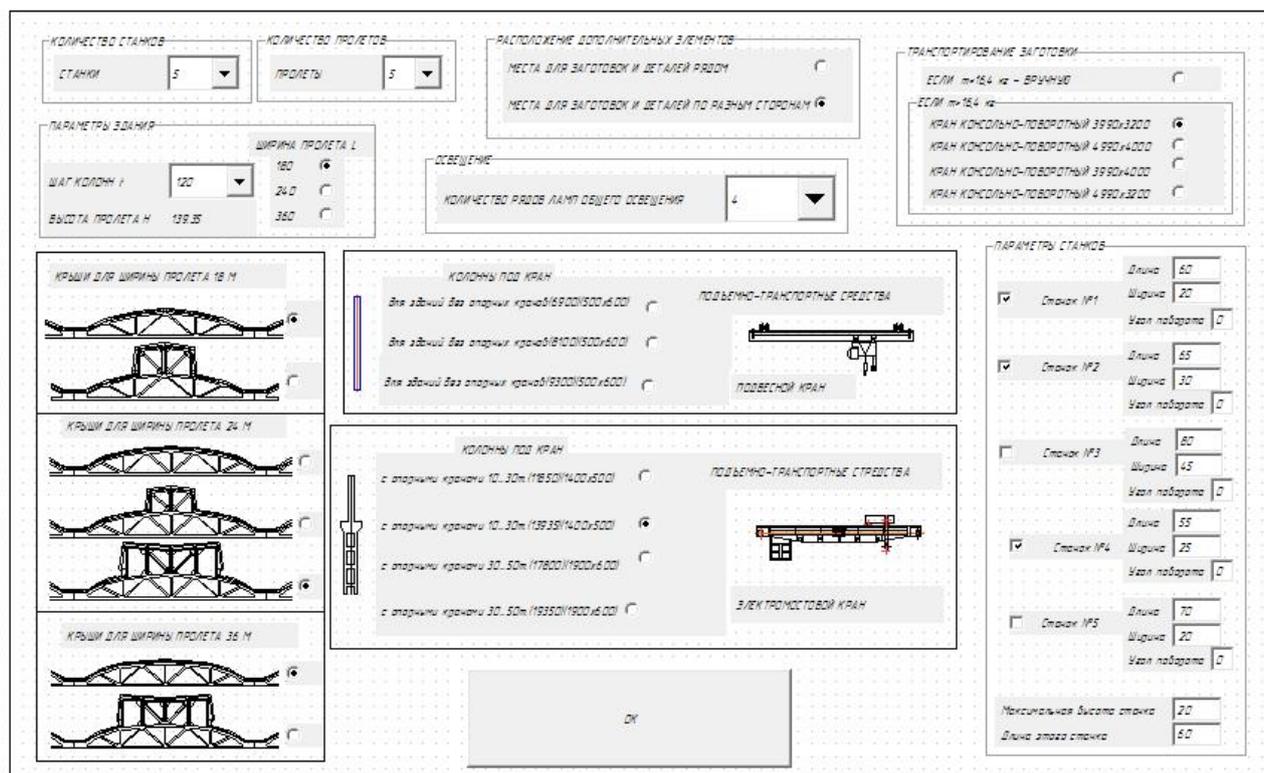


Рисунок 1 – Главное окно программного модуля

Разработанная графическая библиотека позволяет сократить время, затрачиваемое конструкторами на проектирование плана участка механического цеха, за счет применения средств автоматизированного проектирования. Так же позволяет автоматически задавать параметры (габариты) станков, выбирать из графической библиотеки необходимые конструкции крыш, колонн, подъемно-транспортное оборудование.

Получаемая планировка цеха представляется на выходе в качестве 2D параметрического чертежа. Разработанная автоматизированная система представляет собой графическую библиотеку элементов планировок цехов, так же она может использоваться как автоматизированная графическая база данных.

1. Сорокин, С. В. Автоматизация проектирования технологических процессов обработки деталей на современном оборудовании / С. В. Сорокин, Е. А. Польский, Г. А. Федяева // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2012. – № 2-2(292). – С. 56-65.
2. Польский, Е. А. Технологическое обеспечение точности и качества поверхностей деталей машин при проектировании маршрутно-операционного технологического процесса методом синтеза на основе анализа размерных связей / Е. А. Польский // *Научно-технические проблемы машиностроения.* – 2016. – № 10(64). – С. 39-48.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИИ ЧЕРВЯЧНЫМИ ФРЕЗАМИ

Сорокин С.В., Васильева Д.Е., Федонина Д.П.

Брянский государственный технический университет Брянск,  
Российская Федерация

В условиях активной конкуренции особую остроту для машиностроительных заводов приобретает проблема регулярного обновления продукции, выпуска новых модификаций уже разработанных изделий с тем, чтобы удовлетворить запросы максимального числа потребителей. Прежде чем выпустить новую конкурентоспособную продукцию, необходимо провести большую работу по сбору, накоплению и оперативной обработке информации. Переработка больших объемов информации в настоящее время невозможна без использования компьютерной техники. Создание новой техники в машиностроении происходит в такой последовательности: на основе анализа выпускаемой продукции проектируется новая, обладающая более высокими эстетическими, эксплуатационными или другими свойствами, затем производятся инженерные расчеты и моделирование, технологическая подготовка производства, изготовление и сбыт изделия. Недостаточная оснащенность конструкторских и технологических подразделений современными САПР приводит к неполной проработке конструктивных и технологических решений, к материальным и временным потерям на стадии изготовления и во время эксплуатации [1].

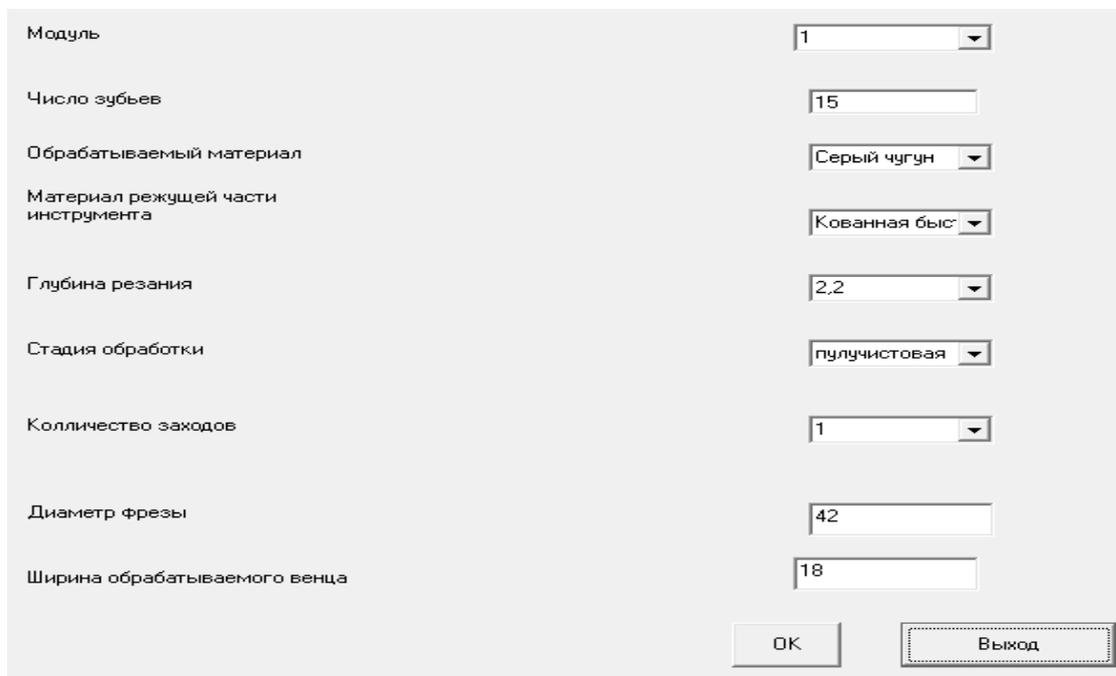
Разрабатываемая автоматизированная система предназначена для выбора оптимальных режимов резания и расчёта основного времени обработки при нарезании зубчатых венцов модульными червячными фрезами. Основной задачей рассматриваемой САПР является уменьшение времени затрачиваемого при проектировании операций зубофрезерования [2]. Данная автоматизированная система может применяться работниками предприятий, проектирующими технологические процессы обработки изделий, а так же студентами при выполнении курсовых и дипломных проектов .

Для выполнения расчёта необходимо ввести (выбрать) следующие исходные данные:

1. вид обработки (предварительная, однократная окончательная, однократная под шевингование, окончательная после предварительной, под шевингование после предварительной);
2. обрабатываемый материал (углеродистая сталь, легированная сталь);
3. число зубьев (1-100), шт;
4. модуль (1...10), мм;
5. материал заготовки и инструмента;
6. глубина резания, мм;

7. длина зуба, мм;
8. число заходов и диаметр фрезы;
9. производительность фрезы (нормальная, повышенная).

После анализа введённой и полученной из базы данных информации производится расчёт и вывод на экран рекомендуемых режимов резания и норм основного времени при зубообработке (рис. 1).



The screenshot shows a software interface for configuring gear processing parameters. It consists of a list of labels on the left and corresponding input fields on the right. The labels and their values are: 'Модуль' (1), 'Число зубьев' (15), 'Обрабатываемый материал' (Серый чугун), 'Материал режущей части инструмента' (Кованная быс), 'Глубина резания' (2,2), 'Стадия обработки' (пулчистовая), 'Количество заходов' (1), 'Диаметр фрезы' (42), and 'Ширина обрабатываемого венца' (18). At the bottom right, there are two buttons: 'ОК' and 'Выход'.

Рисунок 1 – Главное окно системы

При необходимости осуществляется формирование отчета – результаты проделанной работы сохраняются в текстовом формате. Эти данные могут быть отправлены на печать.

В ходе выполнения проекта была создана автоматизированная система расчёта режимов резания и основного времени при зубообработке, которая позволяет сократить время проектирования технологических процессов. САПР может найти применение на предприятиях, а также в учебном процессе студентов всех форм обучения и специальностей.

1. Сорокин, С. В. Технологическое обеспечение параметров точности и качества деталей узлов трения на этапах подготовки производства / С. В. Сорокин // Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте : Материалы 19-го Международного научно-технического семинара, Кошице, 18–22 февраля 2019 года. – Кошице: АТМ Украины, 2019. – С. 188-191.
2. Сорокин С.В., Концепция автоматизации обеспечения эксплуатационных характеристик деталей пар трения с применением интегрированных САПР / Матер. междунар. науч.-тех. конф. «Обеспечение и повышение качества

УДК 621.793

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ УПРОЧНЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКОЙ СКАНИРУЮЩИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

**Швец И.В., Девойно О.Г., Кардаполова М.А.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Возможность упрочнения и модифицирования поверхностей широчайшей номенклатуры материалов сканирующим лучом лазера с повышением их эксплуатационных характеристик требует оптимизации режимов упрочнения при разработке технологии для конкретных условий нагружения упрочняемой пары зубчатых колес.

Сканирующая лазерная обработка позволяет за счет высокой частоты развертки и возможности управления при этом мощностью излучения получать так называемое «псевдопятно» лазерного воздействия с заданным распределением энергии по сечению лазерного пятна.

Достигнутые в настоящий момент результаты позволили формировать прямоугольное пятно с градиентами плотности мощности как в поперечном, так и продольном направлении. Это позволяет значительно расширить технологические возможности лазерной обработки. Исходя из особенностей адаптивной оптической системы, обеспечивающей реализацию сканирующей обработки и полученных экспериментальных результатов, можно сделать следующие выводы по применению поверхностной лазерной закалки сканирующим лучом.

1. Использование адаптивной оптической системы, обеспечивающей реализацию сканирующей обработки, возможно с источниками лазерного излучения, обеспечивающими скорость изменения мощности излучения с частотой не менее 2 кГц.

2. Использование лазерной сканирующей обработки для закалки металлических поверхностей может быть рекомендовано для обработки рабочих поверхностей деталей в качестве чистовой обработки. Это обусловлено возможностью корректировки плотности мощности в зонах псевдопятна лазерного воздействия, где возникает микропроплавление поверхности. Это позволяет расширить область применения лазерной закалки на высокоточные детали сложной формы.

3. При обработке высокоточных деталей следует учитывать изменение геометрических размеров за счет фазовых превращений в поверхностном слое и

формирования полей остаточных напряжений. Указанный фактор учитывается коррекцией размера чистовой обработки относительно номинального размера.

4. Учитывая высокую чувствительность лазерной обработки к структурному состоянию исходной заготовки и стабильности химического состава для каждой новой партии деталей при высокоточной обработке, необходимо производить упрочнение образца-свидетеля, а, при необходимости, упрочнение пробной детали.

5. При лазерной закалке сканирующим лазерным излучением исходная шероховатость не должна превышать  $Ra10$ . При таком значении шероховатости может быть достигнут эффект ее снижения за счет подплавления гребешков. При больших значениях исходной шероховатости после лазерной обработки имеет место ее увеличение и снижение глубины термообработки за счет рассеяния лазерного излучения.

6. При закалке боковых поверхностей зубчатых колес выбор режимов лазерной закалки необходимо производить по критерию обеспечения требуемой толщины закаленного слоя и распределения микротвердости по глубине. Распределение после лазерной обработки должно быть таким, чтобы обеспечивалось превышение твердости материала над величинами напряжений, возникающих в материале зубьев в процессе работы передачи.

7. При выборе толщины упрочняемого слоя для стали 40Х следует руководствоваться приведенной зависимостью расчетной глубины упрочнения от модуля. Режимы закалки деталей из стали 40Х приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Глубина закаленного слоя на боковых поверхностях зубьев зубчатых колес из стали 40Х при закалке сканирующим излучением на различных режимах на оптоволоконном иттербиевом лазере максимальной мощностью 2 кВт

№ п/п	Мощность обработки P, кВт	Ширина обработки b, мм		
		4	6	8
1	0,8	0,60	0,45	0,30
2	1	0,85	0,64	0,43
3	1,2	1,10	0,83	0,55
4	1,4	1,35	1,01	0,68
5	1,6	1,60	1,20	0,80

1. Скойбеда А.Т. Детали машин и основы конструирования: учебник / А.Т. Скойбеда, А.В. Кузьмин, Н.Н. Макейчик; под общ. ред. А.Т. Скойбеда. – 2-е изд., перераб. – Мн., 2006. – 560 с.

2. Девойно О.Г. и др. Эффективность использования лазерной закалки для увеличения прочности зубчатых колес. Сб. трудов восьмой международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов», 11-15 сентября 2017 г., Одесса, Украина. Киев: Международная Ассоциация «Сварка», с. 83-86.
3. Ерицян, С.Л. Разработка методики оценки свойств сталей после лазерной поверхностной закалки. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.03.07 / М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 18 с.

УДК 621.77

## ПОСТРОЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИЧНОСТИ СПЛАВА Cr20Ni50Mo3 В ОБЛАСТИ ПАРАМЕТРОВ ГОРЯЧЕГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ

**Щукин В.Я.<sup>1</sup>, Кожевникова Г.В.<sup>1,2</sup>, Дубенец С.С.<sup>1,2</sup>**

- 1) Белорусский национальный технический университет;
- 2) Минск, Республика Беларусь
- 2) Физико-технический институт НАН Беларуси
- Минск, Республика Беларусь

Поверхность пластичности [1] жаропрочного сплава Cr20Ni50Mo3 при температуре  $T=1100^{\circ}\text{C}$  строилась экспериментально горячей поперечной прокаткой при плоско-деформированном состоянии и последующей холодной прокаткой дискообразного образца. Известно [2], что диаграмма пластичности при заданном постоянном значении параметра третьего инварианта тензора напряжений  $\sqrt[3]{J_3(T_{\sigma})}/\text{K}$  с достаточной точностью описывается зависимостью:

$$\Lambda_{\text{ПР}} = \frac{A}{-(\sigma/\text{K})_{\infty} + \sigma/\text{K}}, \quad (1)$$

где  $\Lambda_{\text{ПР}}$  – предельная степень деформации сдвига;  $A$  – постоянная при определенном значении  $\sqrt[3]{J_3(T_{\sigma})}/\text{K}$ ;  $(\sigma/\text{K})_{\infty}$  – среднее напряжение при  $\Lambda_{\text{ПР}} = \infty$ ;  $\text{K}$  – пластическая постоянная материала.

Поверхность пластичности может строиться двумя способами:

– методом планирования эксперимента определяется математическая модель поверхности пластичности по экспериментам с варьированием параметров  $\sigma/\text{K}$  и  $\sqrt[3]{J_3(T_{\sigma})}/\text{K}$ ;

– используя закономерность (1) строится набор диаграмма пластичности, сумма которых представляет собой поверхность пластичности; при этом поверхность пластичности строится в координатах  $(\sigma/\text{K})_{\text{ср}}$  и  $(\sqrt[3]{J_3(T_{\sigma})}/\text{K})_{\text{ср}}$ .

Второй путь проще, так как использует меньшее количество экспериментов, но при этом следует иметь в виду, что поверхность пластичности в координатах  $\sigma/K - \sqrt[3]{J_3(T_\sigma)}/K$  и  $(\sigma/K)_{cr} - (\sqrt[3]{J_3(T_\sigma)}/K)_{cr}$  могут несколько различаться. Этим способом определена поверхность пластичности жаропрочного сплава Cr20Ni50Mo3 ограниченной деформируемости в области параметров горячего пластического течения при температуре  $T=1100\text{ }^\circ\text{C}$  и скорости движения подвижного инструмента 0,3 м/с при поперечной прокатке. Поверхность пластичности представляет собой сумму диаграмм пластичности для различных значений среднего параметра третьего инварианта тензора напряжений, что подтверждает преемственность обновлённой феноменологической деформационной теории разрушения металлов при пластическом течении с известными закономерностями.

Снижение среднего напряжения и снижение параметра третьего инварианта тензора напряжений увеличивают предельную степень деформации сдвига металла.

Поверхность пластичности для разных видов деформации: однонаправленная монотонная, разнонаправленная монотонная, разнонаправленная немонотонная – значительно различаются.

В поверхности пластичности существует линия, лежащая в вертикальной плоскости, проходящей через точки АБВГ, слева от которой предельная степень деформации сдвига достигает бесконечности, то есть разрушение металла в этой области невозможно. Это обстоятельство дало название механизму дислокационной деформации: механизм неограниченной пластичности.

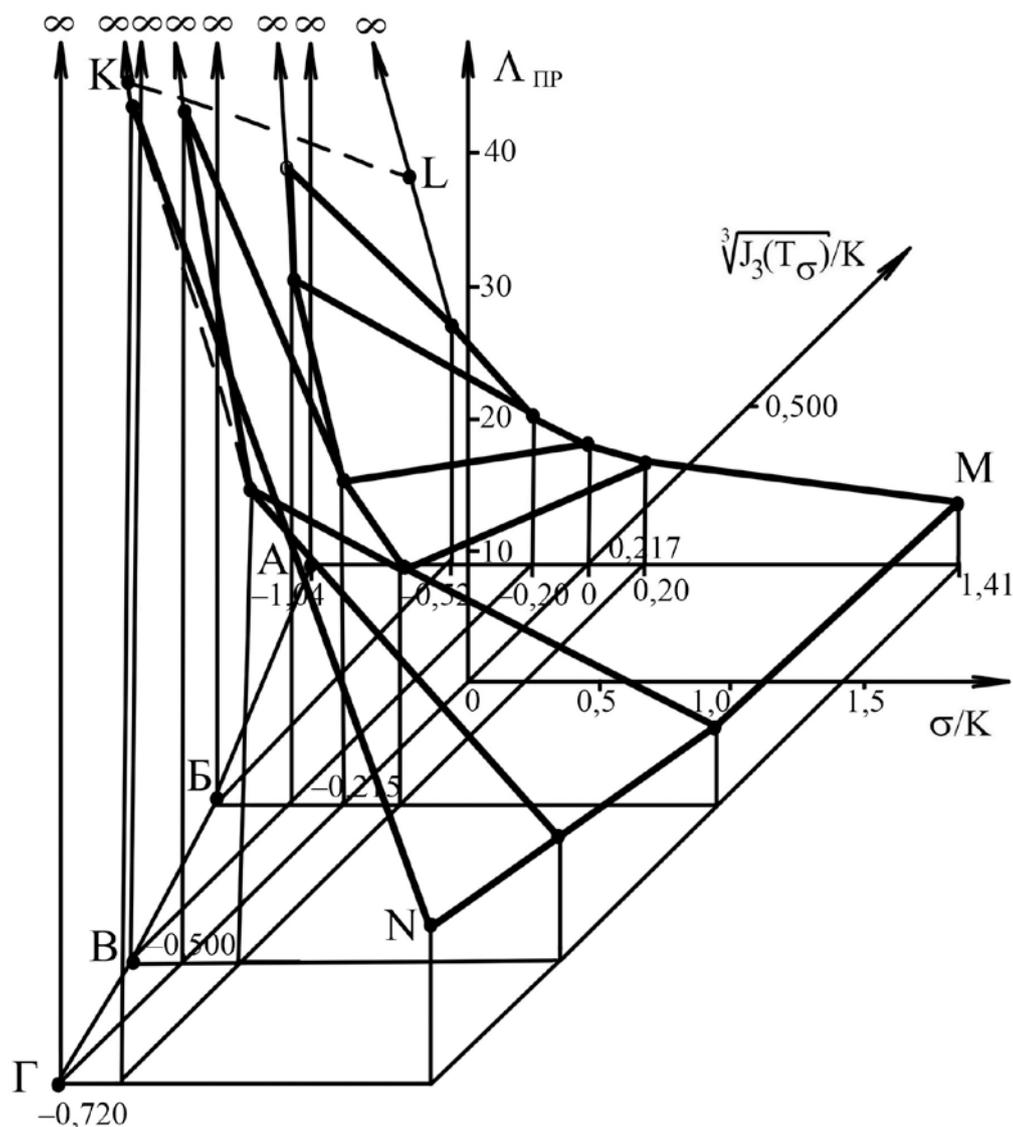


Рисунок – Поверхность пластичности жаропрочного сплава Cr20Ni50Mo3 при температуре  $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , скорости поперечной прокатки  $0,3\text{ м/с}$

1. Кожевникова, Г.В. Теория и практика поперечно-клиновой прокатки / Г.В. Кожевникова. – Минск: Беларус. навука, 2010.
2. Кожевникова, Г.В. Пластические свойства металлов и сплавов: феноменологическая деформационная теория разрушения при пластическом течении / Г.В. Кожевникова, В.Я. Щукин. – Минск: Беларуская навука, 2021. – 277 с.

## ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

Цитович Б.В.<sup>1</sup>, Соломахо В.Л.<sup>2</sup>, Соколовский С.С.<sup>2</sup>

- 1) Белорусский Государственный институт повышения квалификации и переподготовки кадров по стандартизации, метрологии и управлению качеством. Минск, Республика Беларусь;
- 2) Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь.

При производстве машиностроительной продукции основной (по объему проводимых операций) метрологической процедурой является измерительный контроль геометрических параметров деталей. Параметр объекта измерений может быть однократной реализацией физической величины (например, объём детали) или представлять собой бесконечное множество реализаций номинально одинаковых физических величин (например, «толщины» призматической детали). Однако, наряду с измерительным контролем, процесс измерений может иметь иные цели, такие, как исследование технологического процесса, его мониторинг, оценивание качества средств измерений при их поверке или калибровке, оптимизация методик измерений и др.

Контроль традиционно связывают с применением измерений, в результате иногда отождествляют процессы измерений и контроля, что в корне неверно, поскольку измерения осуществляют не только для контроля, а контроль может осуществляться без измерений. Наиболее общий подход к классификации контроля позволяет предложить разделение его на аппаратурный, осуществляемый с применением в качестве базовых средств контроля технических устройств, и экспертный, где контроль осуществляет эксперт – субъект, снабжённый методикой и средствами оценивания, который первичную информацию о свойствах объектов контроля получает в процессе применения собственных органов чувств.

Измерительный контроль является частным случаем аппаратурного контроля. Кроме средств измерений техническими устройствами, используемыми в ходе аппаратурного контроля могут быть индикаторы (детекторы), счётчики, а также средства испытаний. Виды средств аппаратурного контроля и характеристики процессов получения первичной информации в процессе контроля представлены в таблице 1. «Вторичная информация», формируемая в процессе контроля, завершается заключением о соответствии или несоответствии контролируемого свойства объекта установленным нормам, для получения которого применяют специальные процедуры, от простейших (число обработанных за смену деталей должно быть не менее XXX), до весьма сложных (оценивание параметров безотказности изделия при испытании на надёжность).

Таблица 1 – Характеристика средств аппаратурного контроля

Средства аппаратурного контроля	Работа для получения первичной информации
Средство измерений	Определение положения измеряемого свойства на шкале
Индикатор (детектор)	Определение перехода уровня свойства через граничное значение
Счётчик	Определение числа объектов
Средство испытаний	Воздействие на объект для достижения определённого эффекта

В отличие от измерения определённого параметра объекта, при котором возможно построение моделей объекта для оценивания методических погрешностей, в случае измерительного контроля объекта построение его модели, адекватно соответствующей поставленной цели контроля, представляет собой главную задачу, решаемую в ходе формирования «вторичной информации» [1, 2]. Точность измерений параметра в выбранном числе контрольных сечений (контрольных точек) является необходимым но не достаточным условием измерительного контроля. К задачам, решаемым при построении модели объекта измерительного контроля могут относиться выбор минимально необходимого числа «правильно» расположенных контрольных сечений (контрольных точек) и получение в этих сечениях измерительной информации с удовлетворительной точностью с целью последующего сопоставления с нормативной моделью объекта контроля.

ГОСТ 8.051–81 «Государственная система обеспечения единства измерений. Погрешности, допускаемые при измерении размеров до 500 мм» является базой для решения некоторых видов измерительных задач, включая выбор допустимых погрешностей при измерении линейных размеров для случаев приёмочного измерительного контроля и арбитражной проверки правильности его результатов. Для этих задач в стандарте приведены предельные значения допустимых погрешностей, которые можно использовать как критерии их пренебрежимо малых значений, что может обеспечить достоверность результатов контроля.

Однако, хотя приёмочный измерительный контроль играет важную роль в машиностроительном производстве, он не является доминирующим (по объёму) видом контроля, уступая первенство операционному контролю. От приёмочного контроля операционный контроль отличается распространением на все операции обработки продукции, которых в сложном технологическом процессе может быть довольно много. Требования к точности операционного контроля продукции при выполнении промежуточной обработки настолько отличаются от требований к точности приёмочного контроля, что унификации обычно не подлежат.

При входном контроле осуществляется контроль продукции поставщика, поступившей к потребителю или заказчику, предназначенной для использования в ходе изготовления, ремонта или эксплуатации продукции. Очевидно, что поставкам подлежит только годная продукция, успешно прошедшая приёмочный контроль, из-за чего часто считают входной контроль дублем приёмочного, но это слишком прямолинейный подход, не учитывающий особенности конкретного производства. Продукция поставщика может быть не только завершённым изделием, но также и «сырьем», полуфабрикатом, заготовкой или сборочной единицей; она может подлежать доработке или иной трансформации, что вносит определённые особенности в технические требования заказчика.

Проведенный анализ показывает проблемы метрологического обеспечения измерительного контроля разных видов с позиций достижения необходимой точности получения измерительной информации. Цель любого измерения – получить действительное значение измеряемой величины, т.е. значение величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него. Отличить действительное значение величины от любого иного результата измерения, «полученного экспериментальным путем» можно только при наличии критерия пренебрежимой малости погрешности измерения, которым может быть допустимая погрешность измерения. Таким образом проблему метрологического обеспечения точности измерительного контроля параметров можно разделить на следующие последовательно решаемые задачи:

1. Постановка измерительной задачи и установление допустимой погрешности измерения.

2. Разработка (выбор) методики выполнения измерений и получение оценки приписанной погрешности.

3. Сопоставление приписанной выбранной МВИ погрешности с допустимой погрешностью измерения и принятие решения о применимости данной МВИ для измерительного контроля.

Задача 1 требует «специального» подхода, поскольку примеры решений соответствующих задач в большинстве носят частный характер и на некоторые из упомянутых выше случаев метрологического обеспечения измерительного контроля непосредственно не распространяются.

Задачи 2 и 3 – носят типовой характер и решаются при выборе МВИ, а адекватность их реализации определяется квалификации исполнителей.

1. Соломахо В.Л., Цитович Б.В. Роль контроля, измерений и испытаний в обеспечении качества. / Материалы 20 МНТК «Качество, стандартизация, контроль: теория и практика», Киев: АТМ Украины, 2020. – С.121-123.

2. Алесандров В.С., Тайманов Р.Е., Чуновкина А.Г. Проблемы метрологического обеспечения компьютеризированных средств измерений / Журнал «Датчики и системы». - №2. - 2009. - С. 29-32.

## УПРОЧНЕНИЕ НАПЛАВЛЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

**Сакович Н.А.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

В настоящее время при восстановлении деталей машин широко применяются различные виды наплавки. Однако наплавленные поверхности имеют ряд недостатков: неравномерная твердость, пористость и др. Наплавка не позволяет повысить усталостную прочность работающих в условиях трения и знакопеременных нагрузок деталей. Одним из возможных методов устранения указанных недостатков является поверхностная высокотемпературная термомеханическая обработка (ПВ ТМО).

Процесс наплавки даже если он осуществляется в автоматическом цикле, не позволяет получать достаточно однородный слой с необходимыми свойствами. При этом усталостная прочность деталей, работающих при знакопеременных нагрузках, во многих случаях снижается. Свойство наплавленного материала и его структурное состояние, формирующееся в процессе наплавки, могут быть в значительной степени изменены в результате последующей термической обработки.

В качестве материалов образцов, подвергаемых в дальнейшем наплавке и поверхностной термомеханической обработке, была выбрана сталь 40Х. Выбор этой марки материала объясняется тем, что сталь 40Х среди легированных сталей является наиболее распространенной в общем машиностроении. Из этой стали изготавливаются валы, оси, пальцы, стаканы, муфты, кривошипы, шестерни и другие ответственные детали машин. Широкое распространение её в машиностроении обусловлено достаточно высокими механическими характеристиками, простотой состава и сравнительно небольшой стоимостью.

После осуществления процесса упрочнения поверхности подвергались окончательной обработке – однократному шлифованию.

Исследования износостойкости проводились при скоростях скольжения от 0,78 до 3,93 м/с при давлении 9,8 МПа и давлениях от 4,9 до 24,5 МПа и скорости скольжения 2,36 м/с. При этом путь трения образцов составлял  $64 \cdot 10^4$  м.

Как показали проведенные исследования, во всех случаях имеется повышение износостойкости в 2,47...3,06 раза. Кроме того, как показали результаты эксплуатационных испытаний ряда деталей типа валов и осей, износостойкость увеличилась в 2...2,5 раза.

1. Тонышева О.А., Вознесенская Н.М., Шалькевич А.Б., Петраков А.Ф.  
Исследование влияния высокотемпературной термомеханической обработки

на структуру, технологические, механические и коррозионные свойства высокопрочной коррозионностойкой стали с переходным содержанием азота.  
// Авиационные материалы и технологии. – 2012. – №3. – С. 31-36

2. Коджаспиров Г.Е. Термомеханическая обработка – эффективный способ регулирования структуры и свойства металлических материалов и основа ресурсосберегающих технологий // Тезисы докладов Российской научно-технической конференции «Инновационные наукоемкие технологии для России». – СПб. – 1995. – С. 23
3. Кончиц В.В. Электропроводность точечного контакта при граничной смазке // Трение и износ. 1991, т.12, №2. – С. 267-277.

**УДК 539.3**

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ С УЧЕТОМ ПОЛЗУЧЕСТИ МАТЕРИАЛА**

**Василевич Ю.В.<sup>1</sup>, Неумержицкая Е.Ю.<sup>2</sup>, Москалев С.А.<sup>3</sup>,  
Братковский К.А.<sup>1</sup>, Лелес Д.<sup>1</sup>**

1) Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь;

2) Академия последипломного образования Минск, Республика Беларусь;

3) Конструкторское бюро «Дисплей» Витебск, Республика Беларусь.

Явление ползучести (рост деформации при постоянных напряжениях) повсеместно проявляется при воздействии на детали высоких температур. Принято различать три стадии ползучести:

- неустановившаяся ползучесть с затухающей во времени скоростью;
- установившаяся – с постоянной скоростью;
- ползучесть с быстро нарастающей скоростью, заканчивающаяся разрушением детали.

На рисунке изображена цельнолитая подовая плита из стали 20Х25Н19С2Л (длина 970 мм, ширина 630 мм, толщина 20 мм) с продольной сквозной трещиной, образовавшейся в процессе ее эксплуатации. Плита предназначена для размещения на ней изделий для закалки в термопечи в диапазоне изменения температуры 850°С-1020°С.



Рисунок – Зафиксированная трещина в плите

Для оценки работоспособности таких и подобных им изделий используются методы расчета термочности и при необходимости выполняются экспериментальные исследования по изучению зависимости их механических и физических свойств от температуры и некоторых определяющих факторов, влияющих на прочность и долговечность функционирования в заданных эксплуатационных условиях. К числу таких факторов относятся: время действия и изменения нагрузки, продолжительность термообработки, концентрация напряжений, вид деформаций, геометрия изделий и др.

Анализ результатов экспериментальных исследований [1] микроструктуры материала в зоне разрушения образцов при высоких напряжениях показал, что в них зафиксирована вытянутость зерен, искривление блоков двойникования, вызванных внутризернным скольжением, связанным с большой деформацией ползучести, накапливаемой до разрушения. Неравномерность деформирования различных элементов структуры (зерен, границ зерен, двойников) приводит к возникновению высоких напряжений в макрообъемах металла, особенно в местах стыков зерен, и образованию трещин (клиновидного характера) по границам зерен и двойников [2] предшествующих разрушению образца. Развитие трещин при более низких напряжениях, связано с разупрочнением границ зерен, с появлением на границе макропор, число и размеры которых возрастают по мере движения длительности действия температуры.

Поскольку теория ползучести при сложных напряженных состояниях близка по содержанию положениям теории термопластичности, то методика расчета термочности при высоких температурах для рассматриваемого случая основывается на следующих этапах расчета.

1. Суммарную деформацию материала надо рассматривать состоящую из упругой  $\varepsilon_{ij}^{уп}$ , пластической  $\varepsilon_{ij}^{пл}$ , деформации ползучести  $\varepsilon_{ij}^п$  и температурного расширения  $\delta_{ij}\varepsilon^T$

$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{уп} + \varepsilon_{ij}^{пл} + \varepsilon_{ij}^п + \delta_{ij}\varepsilon^T$ , где  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера,  $T$  – температура.

2. Средняя деформация ползучести равна нулю  $\varepsilon^п = 0$  и компоненты деформации ползучести совпадают с компонентами девиатора  $\varepsilon_{ij}^п = e_{ij}^п$ .

Скорости деформаций определим дифференцируя по времени выше приведенные формулы

$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^{уп} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{пл} + \dot{\varepsilon}_{ij}^п + \delta_{ij} \dot{\varepsilon}^T$ ;  $v^п = 0$ ;  $v_{ij}^п = \dot{\varepsilon}_{ij}^п$ .

3. Компоненты скорости ползучести  $v_{ij}^п$  пропорциональны девиаторным компонентам напряжений  $\sigma_{ij}$  [1]

$v_{ij}^п = \frac{3}{2} \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_i} v_i^п$ , где  $v_i^п$  интенсивность скорости деформации ползучести.

Выполненные исследования показали, что установленный эксплуатационный период времени функционирования плиты рекомендуется осуществлять не в одном непрерывном этапе отжига с достижением требуемой температуры нагрева, приводящему к неравномерному распределению температуры по толщине изделия, а принять к исполнению процесс нагрева поэтапный. На каждом этапе нагрев плиты осуществлять до определенной

температуры, затем сделать выдержку этой температуры по времени до достижения на каждом этапе равномерного нагрева плиты по толщине, не превышая  $\sigma_B=500$  МПа и  $\sigma_{02}=250$  МПа [3].

1. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Демьянушко И.В. и др. Термопрочность деталей машин // М.: Машиностроение. – 1975. – 455 с.
2. Василевич, Ю.В. Выполнение условия равновесия твердого тела с нетонким остаточным клиновидным двойником в случае плоскодеформированного состояния / Ю.В. Василевич, О.М. Остриков // Республиканский межведомственный сборник научных трудов «Машиностроение». Минск, вып. 33, 2021, с. 128-134.
3. Марочник сталей и сплавов. Механические свойства стали 20Х25Н19С2Л.

**УДК 621.923.6**

## **АНАЛИЗ ОПЕРАЦИИ ЗАТЫЛОВАНИЯ СТАНДАРТНЫХ ДИСКОВЫХ МОДУЛЬНЫХ ФРЕЗ МЕТОДОМ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Ажар А.В., Осадчий Е.Н., Ишкуло П.Ю.**

Белорусский национальный технический университет Минск, Республика Беларусь

Дисковые модульные фрезы – это разновидность фасонных дисковых насадных однониточных фрез. Они применяются для чернового и чистового нарезания прямозубых цилиндрических колес, чернового нарезания зубьев косозубых колес, чернового, а иногда чистового нарезания прямозубых конических колес, зубчатых реек, шлицевых валов методом копирования в условиях единичного и мелкосерийного производства. Фрезы затылованные, профиль зуба выполнен по эвольвенте. Теоретически для каждого нарезаемого колеса необходимо иметь свою фрезу. Практически, с некоторой погрешностью, одной фрезой данного модуля можно обрабатывать зубчатые колеса с определенным числом зубьев. Профиль зуба фрезы, входящий в набор, соответствует наименьшему числу зубьев определенного интервала. ГОСТ 10996 — 64 установлено два набора фрез: из 8-ми фрез для нарезания колес с модулем до 8 мм; из 15-ти фрез для колес с модулем свыше 8 мм [1].

Основной способ заточки задней поверхности фасонной фрезы при изготовлении – затылование по кривой в виде спирали Архимеда [2, 3]. Этот метод наиболее простой с точки зрения реализации и имеющегося оборудования. Фрезы перетачиваются при затуплении только по передней поверхности, независимо от вида износа, а затылование по спирали Архимеда позволяет сохранить высоту профиля зуба и обеспечить удовлетворительные задние углы во всех радиальных сечениях зуба на всех конхоидах как у нового, так и восстановленного инструмента. Затылование шлифованием наиболее

трудоёмкая, сложная и ответственная операция на которой достигается требуемая точность и качество изготовления инструмента. Наибольшую производительность операции затылования обеспечивают цилиндрические спрофилированные шлифовальные круги. При этом стремятся выбрать круг наибольшего диаметра. Однако при таком выборе часто не удается получить затылок, прошлифованный по всей длине зуба, т.к. в конце рабочего хода круг может задеть соседний зуб. Недобег круга часто приводит к образованию «седла» на зубе. Решить эту проблему не удастся даже при уменьшении числа зубьев. При этом современное производство нацелено на использование так называемые «многозубых» фрез повышенной производительности.

На практике минимальный диаметр шлифовального круга для затылования задних поверхностей рассчитывается по формуле (1):

$$D_{кр.min.} = \frac{D_{фр}}{2} * \sin \frac{180}{z} * \frac{1}{\sin \alpha_\alpha}, \quad (1)$$

где  $D_{фр}$  - диаметр фрезы, мм;  $z$  - число зубьев;  $\alpha_\alpha$  - задний угол на зубе.

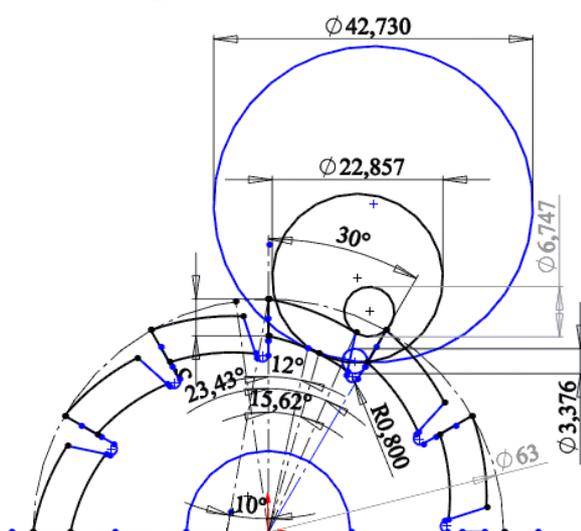
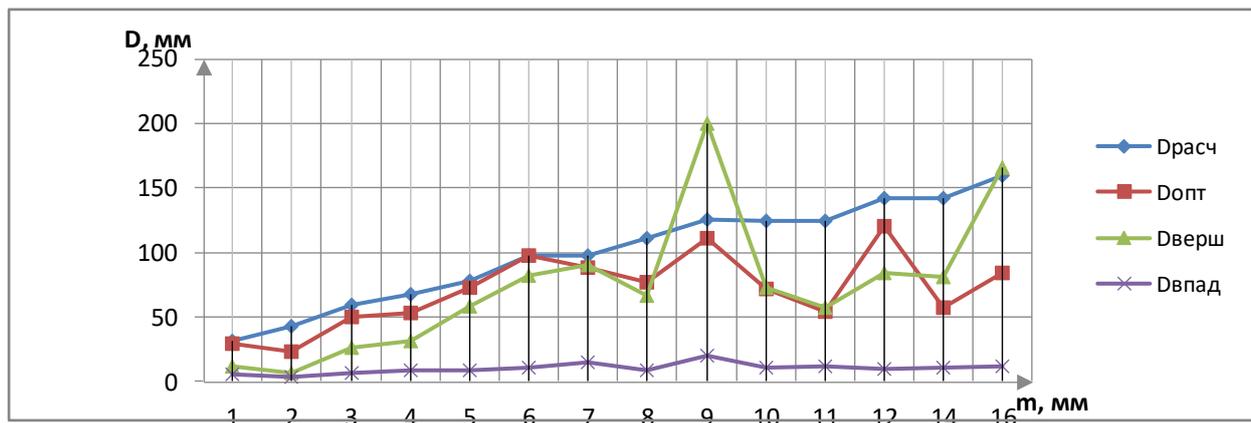


Рис. 1 – Моделирование диаметра круга для затылования фрезы модулем  $m=2$  мм

Разработанная методика 3D моделирования операции затылования фасонной фрезы с использованием современных векторных САПР позволяет выбрать оптимальный диаметр, профиль и положение шлифовального круга [4]. Она основана на построении окружности (образующей наружного контура профиля шлифовального круга), касательной к образующей затылка зуба в выбранном радиальном сечении и проходящей через соответствующую точку профиля на передней поверхности соседнего зуба (рис. 1).

Моделирование затылования ряда фасонных фрез показало несостоятельность зависимости (1), т.к. она не учитывает изменяющиеся параметры глубины фасонного профиля зуба и угол впадины стружечной канавки фрезы [5]. С целью определения оптимальных диаметров шлифовальных кругов, обеспечивающих заточку профиля зуба на 2/3 длины, и сравнения условий заточки зубьев фрез кругами, рассчитанными по формуле (1) проведено моделирование операции затылования стандартных дисковых фрез модулем  $m=1...16$  мм (рис. 1). Оценка эффективности применения рассчитанных и смоделированных кругов, осуществляется путем сравнения диаметров кругов и длин (углов) затылования при их использовании (рис. 2, 3).



$D_{расч}$  - диаметр шлифовального круга (ШК) для затылования полученный по формуле (1);  $D_{опт}$  - диаметр ШК для затылования 2/3 длины профиля, полученный моделированием;  $D_{верш}$  - диаметр ШК для полного затылования по вершине зуба;  $D_{впад}$  - диаметр ШК для полного затылования по впадине зуба  
 Рис. 2 – График зависимости диаметра шлифовального круга от модуля фрезы

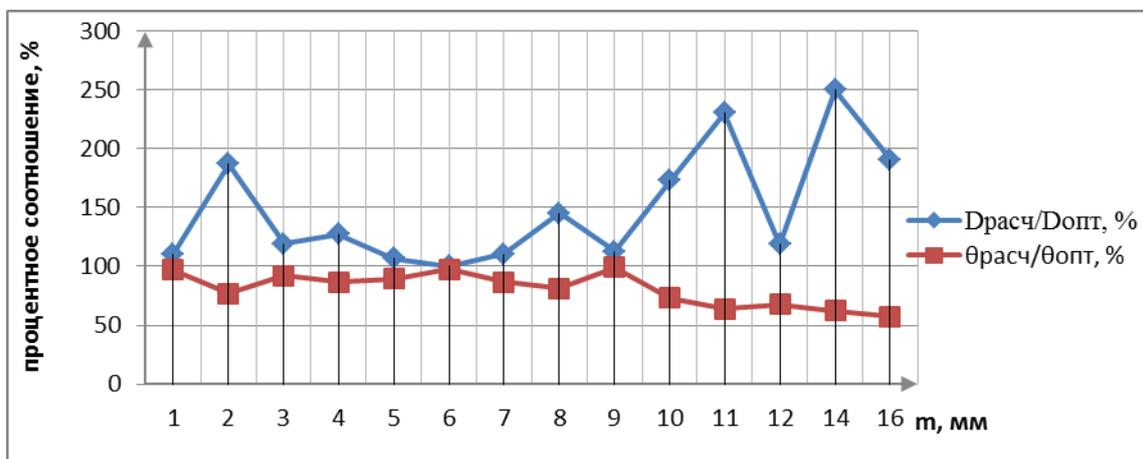


Рис. 3 – Сравнение расчетных и оптимальных диаметров шлифовальных кругов и длин затылования для фрез модулем  $m = 1 \dots 16$  мм

Так, совпадение диаметра, рассчитанного и смоделированного оптимального круга, как и длины затылования наблюдается только для фрез модулем  $m=6$  мм. Для фрез с  $m=1$  мм и  $m=9$  мм значения диаметров и длин затылования имеют минимальные различия. В остальных случаях диаметр смоделированного круга получается меньше расчетного. Разница между диаметрами кругов достигает 2,5 раз для затылования фрез с  $m=14$  мм, а длин затылования 42% для заточки фрез с  $m=16$  мм. При этом длина затылования рассчитанным кругом уменьшается по сравнению с оптимальным, но в меньшей степени чем происходит увеличение диаметра круга. Таким образом, в случае преобладающего влияния стоимости операции затылования на стоимость инструмента и его эксплуатации диаметр круга необходимо выбирать по расчётным зависимостям. В случае большего влияния на цену эксплуатации фрезы цены восстановления и суммарного ресурса инструмента

следует выбирать смоделированные круги обеспечивающие оптимальную длину затылования зуба.

Проведенный анализ геометрии шлифовальных кругов для затылования стандартных дисковых модульных фрез подтверждает необходимость учета при выборе диаметра круга не только окружного шага и диаметра затачиваемой фрезы, но и высоты профиля зуба с углом межзубой впадины.

1. Фельдштейн, Е.А. Металлорежущие инструменты: справочник конструктора / Е.А. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – Минск: Новое знание, 2009. – 1039 с.
2. Хайруллин А.В., Шапарев А.В. Особенности затылования режущего клина сложнопрофильного инструмента // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2017. – Т. 39. – С. 1166–1170. – URL: <http://e-koncept.ru/2017/970560.htm>.
3. Палей, М.М. Технология шлифования и заточки режущего инструмента / М.М. Палей, Л.Г. Дибнер, М.Д. Флид. – М.: Машиностроение, 1988. – 288 с.
4. Ажар А.В., Минасян Г.О., Кошевой А.Н. Оптимизация операции заточки затылованных дисковых фасонных фрез методами компьютерного 3D моделирования. Научное издание «НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ-2020». Сборник материалов VII Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума 17–18 ноября 2020 года. Том 1, г. Минск, БНТУ, 2020. – 252 с.
5. Ажар А.В., Осадчий Е.Н., Ишкуло П.Ю. 3D моделирование оптимального затылования дисковых модульных фрез. Научное издание «НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ-2021». Сборник материалов VIII Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума 11–12 ноября 2021 года. ТОМ 1, г. Минск, БНТУ, 2021. – 188 с.

**УДК 621.785**

## **УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА**

**Нисс В.С.<sup>1</sup>, Алексеев Ю.Г.<sup>1</sup>, Королёв А.Ю.<sup>1</sup>, Калиниченко А.С.<sup>2</sup>,  
Будницкий А.С.<sup>1</sup>, Сенченко Г.М.<sup>1</sup>**

1) Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

2) Белорусский государственный технологический университет,  
Минск, Республика Беларусь

В качестве альтернативы существующим методам упрочнения поверхности титана и титановых сплавов предложен метод электрохимико-термической обработки – электролитно-плазменный нагрев в азот- или углеродсодержащем электролите с последующей закалкой путем отключения рабочего напряжения. При подаче напряжения в диапазоне 100–300 В на

электрохимическую ячейку, вокруг заготовки происходит локальное вскипание жидкости за счет выделения джоулева тепла. В этих условиях электролит вблизи поверхности заготовки разогревается до температуры кипения и обрабатываемая заготовка, оказываясь отделенной от основной массы электролита, разогревается до температур 400–1100 °С. Высокие температуры заготовки позволяют проводить насыщение поверхности атомами легких элементов, содержащихся в веществах-донорах, растворенных в электролите. Наличие в электролите углеродсодержащих и азотсодержащих компонентов обуславливает определенный углеродный или азотный потенциал парогазовой оболочки, в результате чего становится возможной химико-термическая обработка. В условиях электролитно-плазменного нагрева интенсифицируются диффузионные процессы, что позволит значительно сократить время химико-термической обработки до 5–10 мин.

Преимуществами такого метода перед другими существующими методами термической обработки является высокая скорость нагрева заготовки (до 250 °С/с), а также высокая скорость диффузионного насыщения (до 100 мкм/мин). Кроме того, применение электролитно-плазменного нагрева позволяет сформировать на поверхности защитный оксидный слой, обеспечивающий дополнительное повышение коррозионной стойкости.

В работе установлены закономерности формирования микроструктуры поверхностного слоя титана при цементации с применением электролитно-плазменного нагрева. Для исследований использовались цилиндрические образцы из титана ВТ1 диаметром 2 мм длиной 40 мм. В качестве основного компонента электролита, обеспечивающего его электропроводность, использовался раствор хлорида аммония концентрацией 10 %. В качестве донора углерода в электролит добавлялся глицерин (5–10%). Температура электролита поддерживалась в пределах  $20 \pm 3$  °С. Напряжение обработки составляло 150, 175 и 200 В. Продолжительность обработки образцов – 10 мин.

На рисунке 1 представлены зависимости, характеризующие распределение микротвердости  $HV_{0,1}$  в поверхностном слое образцов после цементации при различных значениях рабочего напряжения. При напряжении 150–175 В происходит незначительное увеличение микротвердости (на 30–100 HV). При напряжении 200 В увеличение микротвердости является более существенным. Так, при концентрации глицерина 10 % микротвердость на глубине 50 мкм от поверхности составила 512 HV. Причем упрочнение наблюдается по всей исследуемой глубине поверхностного слоя (до 500 мкм).

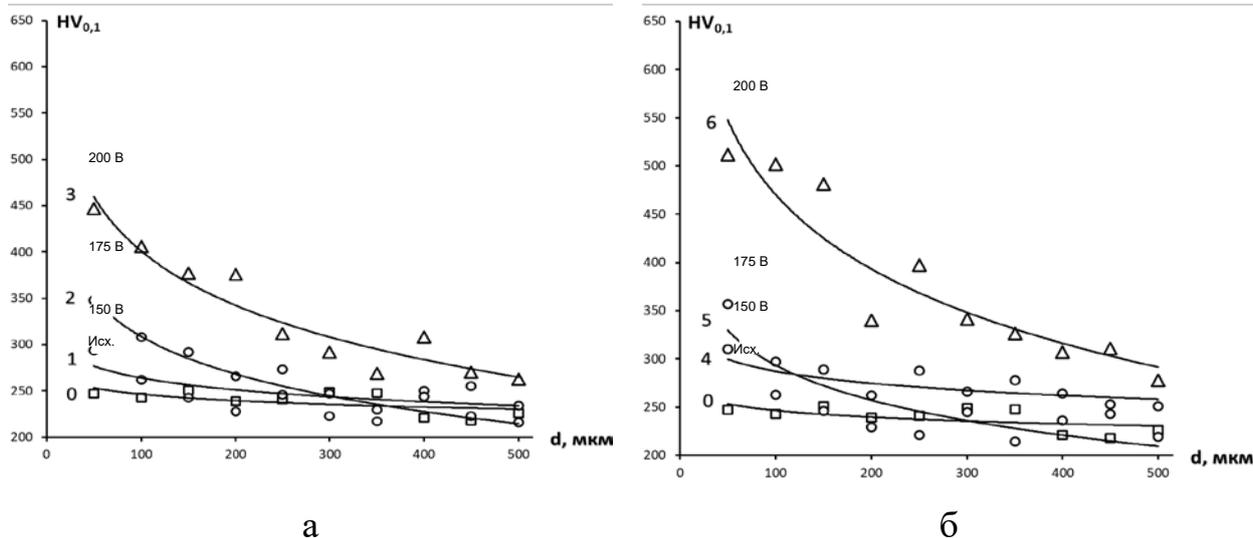


Рисунок 1 – Распределение микротвердости в поверхностном слое после цементации при концентрации глицерина 5% (а) и 10% (б)

На рисунке 2 представлены фотографии микроструктуры поверхностного слоя после цементации в электролите с содержанием глицерина 10 %. Электролитная-плазменная модификация при напряжении 150–175 В приводит к формированию равноосной структуры, состоящей из  $\alpha$ -фазы. В поверхностном слое, наиболее насыщенном углеродом (толщиной около 50  $\mu\text{m}$ ), наблюдается увеличение зёрен в 2–3 раза относительно основы. Увеличение напряжения до 200 В ведёт к формированию пластинчатой структуры, представляющей собой  $\alpha'$ -фазу – мартенсит, полученный после быстрого охлаждения титана ВТ1 с температуры, превышающей температуру полиморфного превращения.

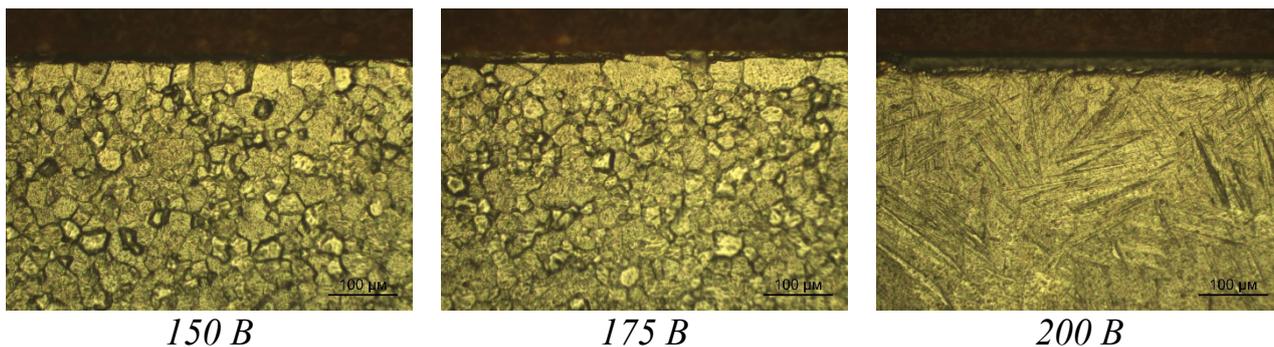


Рисунок 2 – Микроструктура образцов после цементации

## ПОЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В УПРАВЛЯЕМЫХ ИМПУЛЬСНЫХ РЕЖИМАХ ЭЛЕКТРОЛИТНО- ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Королёв А.Ю., Нисс В.С., Алексеев Ю.Г., Паршутто А.Э., Будницкий А.С.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Для снижения энергоемкости и повышения эффективности процесса электролитно-плазменной обработки (ЭПО) с целью, модификации и полирования поверхности изделий из металлических материалов, их размерной обработки при сохранении высокой интенсивности, качества и экологической безопасности разработан новый импульсный метод (импульсная ЭПО), совмещающий преимущества как электрохимического, так и электролитно-плазменного процесса. Разработанный метод импульсной ЭПО основан на применении униполярного импульсного режима с длительностью импульсов 0,5–10 мс и амплитудой более 200 В, при котором в пределах каждого импульса последовательно чередуются электрохимическая стадия, переходная стадия и устойчивая стадия ЭПО. Повышение эффективности разработанного процесса импульсной ЭПО достигается за счет основного интенсивного съема металла при реализации электрохимической стадии с низкими энергетическими затратами и оптимизации продолжительности электролитно-плазменной стадии, при которой обеспечивается высокое качество поверхности.

В работе исследовалось влияние состава и температуры электролита на съем металла и качество обрабатываемой поверхности. Обрабатываемый образец с размерами 20x5x1 мм (площадь обработки 2,45 см<sup>2</sup>) изготавливался из нержавеющей стали 304. Напряжение источника питания составляло 250 В. Обработку выполняли в электролитах двух составов: водный раствор сульфата аммония с концентрацией 3, 4 и 5 %; водный раствор сульфата аммония с концентрацией 4 % с добавлением лимонной кислоты 0,5, 1,0 и 1,5%. Температура электролитов составляла 60 и 80 °С. Временные параметры импульса: длительность импульса – 0,7 мс, длительность паузы – 0,3 мс. Время обработки образцов – 3 мин.

Установлено, что наименьшие значения шероховатости (Ra 0,045 и 0,050 мкм) при обработке в растворе сульфата аммония достигаются при его концентрации 5 % при температуре электролита 80 и 60 °С соответственно. В двухкомпонентном электролите (с добавлением лимонной кислоты) наименьшие значения шероховатости Ra 0,046 и 0,051 мкм достигаются при концентрации лимонной кислоты 0,5 % при температуре 60 и 80 °С соответственно (рисунок 1). Снижение массы образца достигает максимального значения 6,6 мг·мин/см<sup>2</sup> в электролите состава 3 % сульфата аммония при температуре 60 °С, минимальное значение 2,4 мг·мин/см<sup>2</sup> – в электролите на

основе 4% сульфата аммония с добавлением 1,5 % лимонной кислоты при температуре 80 °С.

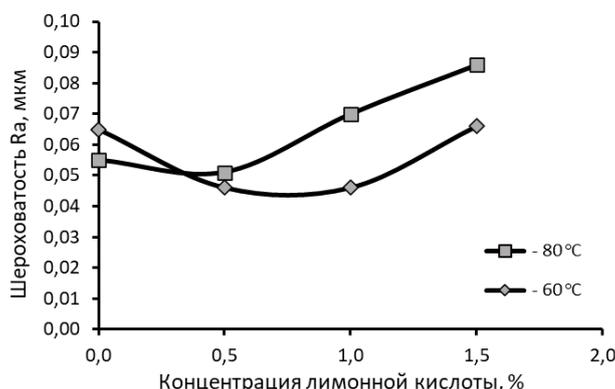
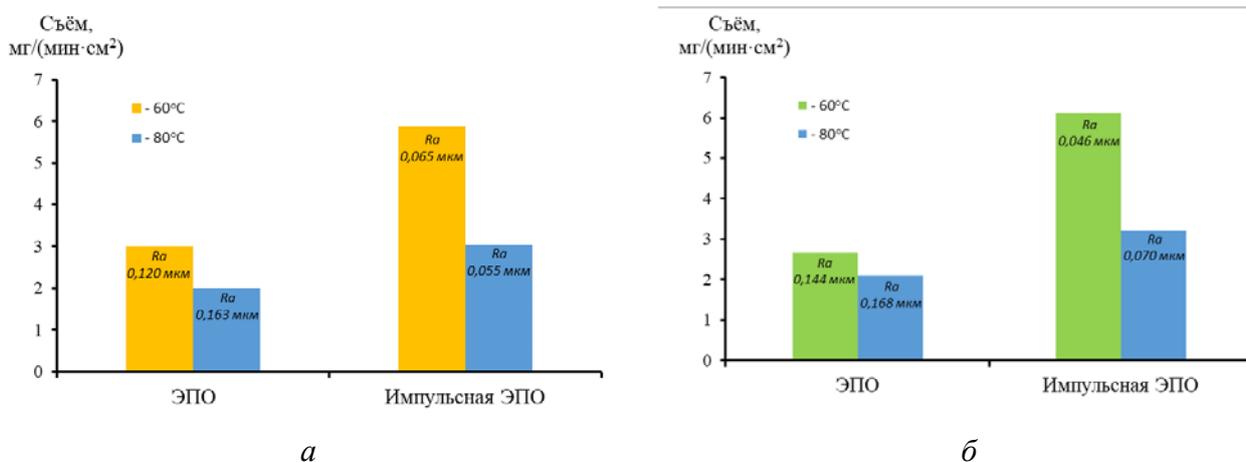


Рисунок 1 – Зависимость шероховатости Ra от концентрации добавки лимонной кислоты и температуры электролита

Для сопоставления результатов, полученных в импульсном режиме, с результатами, достигаемыми при традиционной ЭПО, выполнялась обработка образцов при постоянном напряжении 250 В в электролитах такого же состава (4 % сульфат аммония и 4 % сульфат аммония + 1 % лимонная кислота). Продолжительность обработки образцов составляла 3 мин. Измерялась шероховатость и масса образцов до и после обработки, затем по съему определялась производительность (рисунок 2).



а – сульфат аммония; б – сульфат аммония с лимонной кислотой

Рисунок 2 – Результаты сравнения производительности и качества поверхности при обработке в импульсном режиме и на постоянном токе

По сравнению с обработкой на постоянном токе импульсный режим обеспечивает значительно большую производительность (выше в 1,5–2,3 раза), за счет чего происходит более качественное сглаживание поверхности. При обработке в электролите с добавлением лимонной кислоты в импульсном режиме в зависимости от температуры обеспечивается шероховатость Ra 0,046–0,070 мкм, а при обработке на постоянном токе Ra 0,144–0,168 мкм.

## **ПОЛУЧЕНИЕ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ВЕНТИЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИМПУЛЬСНОГО МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ**

**Нисс В.С., Алексеев Ю.Г., Королёв А.Ю., Паршута А.Э., Сорока Е.В.**  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Микродуговое оксидирование (МДО) относится к экологически безопасным процессам, так как позволяет проводить обработку в электролитах с низкой концентрацией неагрессивных компонентов. При этом отсутствует необходимость тщательной предварительной подготовки поверхности перед обработкой. Данный вид обработки относится к электрохимическим процессам и отличается от традиционного анодного оксидирования наличием электрических разрядов на обрабатываемой поверхности, что, в свою очередь, оказывает существенное влияние на структуру и свойства получаемых оксидных покрытий [1]. Кроме того, процесс ведется при более высоких напряжениях – до 1000 В, причем чаще используется не постоянный, а переменный и импульсный токи.

МДО широко используется для нанесения покрытий на многие вентильные металлы и их сплавы, широко применяемые в машиностроении. Недостатками традиционных методов МДО являются большая продолжительность обработки (до 180 мин) для формирования оксидных слоев необходимой толщины с требуемыми свойствами и, соответственно, высокие энергетические затраты.

Для повышения производительности с возможностью управления структурой и свойствами формируемых оксидных слоев предложен метод, основанный на использовании полностью управляемых по амплитуде и длительности разнополярных импульсов амплитудой до 600 В с регулируемой частотой от 0,05 до 2,5 кГц.

В работе исследовалось влияние частоты импульсов на структуру, толщину и шероховатость формируемых покрытий. Для исследования процесса МДО выбирались следующие параметры режимов оксидирования: частота следования импульсов – 50, 500, 1000 и 2500 Гц, коэффициент заполнения – 50 %, амплитудное значение положительных импульсов – 500 В, отрицательных – 50 В. Для исследования использовались плоские образцы с размерами 40x5x1,2 мм, изготовленные из алюминиевого сплава АМг2. Обработка выполнялась в электролите следующего состава: КОН – 2,0 г/л, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·5H<sub>2</sub>O – 9,5 г/л. Температура электролита поддерживалась в диапазоне 20–25 °С. Продолжительность обработки составляла от 10 до 60 мин.

Измерение шероховатости поверхности образцов до и после обработки производилось профилометром MarSurf PS1. Контроль и запись формы

импульсов тока и спектрограмм осуществлялись запоминающим цифровым осциллографом Owon XDS3000. Микрофотографии поверхности образцов получены с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA II LMU с микроанализатором INCA350.

В результате обработки при всех исследованных значениях частоты следования импульсов формировался оксидный слой толщиной 33–53 мкм (после продолжительности 60 мин) с твердостью около 950 НВ. Применение высокочастотных режимов по сравнению с обработкой на частоте 50 Гц приводит к формированию более плотного оксидного слоя с существенно меньшей пористостью (рисунок 1). Шероховатость образцов при использовании высокочастотных режимов значительно ниже. Наиболее качественное покрытие формируется при частоте 1000 Гц (рисунок 2).

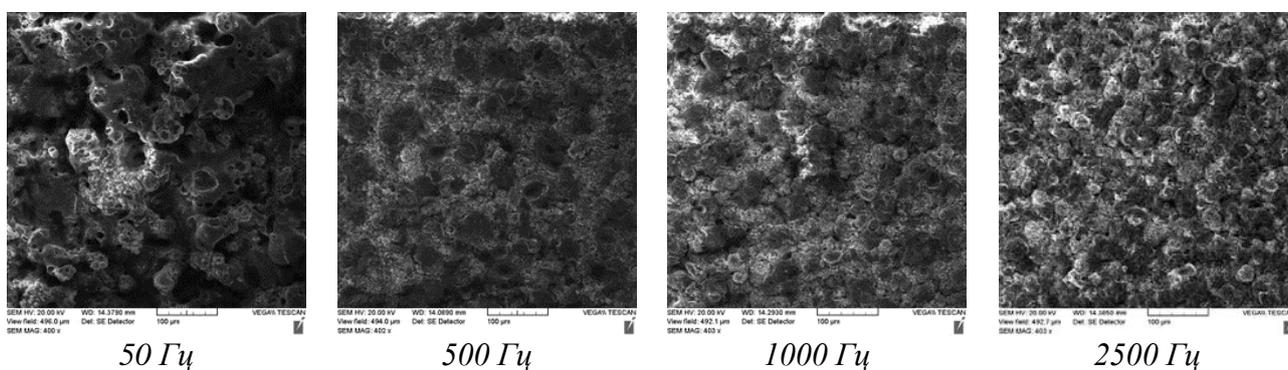


Рисунок 1 – Морфология формируемого оксидного слоя при различных значениях частоты после обработки продолжительностью 60 мин

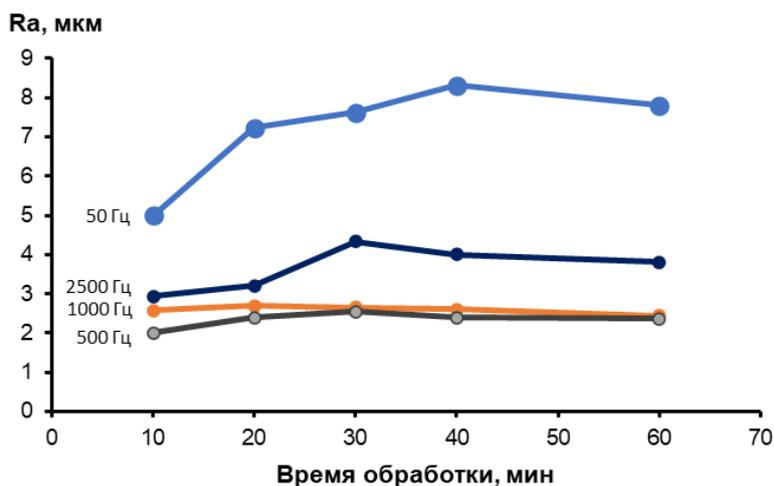


Рисунок 2 – Влияние продолжительности МДО на изменение шероховатости поверхности при различных значениях частоты

1. Суминов, И. В. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборуд.) / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин, Б.Л. Крит, А.М. Борисов –М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 368 с.

## **ФОРМИРОВАНИЕ СВЕТОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ДЛИННОМЕРНЫХ ТРУБЧАТЫХ ИЗДЕЛИЙ МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ**

**Алексеев Ю.Г., Нисс В.С., Королёв А.Ю., Сенченко Г.М.,  
Паршутто А.Э., Янович В.А.**

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Светопоглощающие покрытия применяются в электронно-оптических системах, в приборостроении для снижения рассеянного светового фона, а также при изготовлении приемников излучения, преобразователей солнечной энергии, устройств оптической обработки информации, которые изготавливаются, как правило, из алюминиевых и титановых сплавов. Такие покрытия обеспечивают ослабление фонового излучения.

Существующие в настоящее время методы получения светопоглощающих покрытий включают химические методы, анодное оксидирование с последующим окрашиванием в анилиновых красителях, электрохимическое осаждение, вакуумно-плазменную обработку, микродуговое оксидирование (МДО). Применяемые методы МДО, обеспечивают высокие прочностные и эксплуатационные характеристики светопоглощающих покрытий: высокую износостойкость, твердость, термостойкость, коррозионную стойкость, хорошую адгезию к основе. Однако, основной проблемой является создание на основе метода МДО таких покрытий на внутренних поверхностях длинномерных изделий и изделий сложной формы.

Для решения проблемы получения качественных покрытий на внутренних поверхностях разработаны новый метод и оборудование, основным компонентом которого является специальная электродно-гидравлическая система, которая позволяет создавать в зоне обработки необходимые электрические и гидравлические условия для успешного протекания микродугового плазменного процесса. Характеристики оборудования позволяют формировать светопоглощающие покрытия на поверхности образцов с возможностью управления их структурой и свойствами за счет изменения характеристик процесса МДО. Погружение электрода-инструмента в зону обработки осуществляется с помощью модуля перемещения, который приводится шаговым двигателем через винтовую передачу (рисунок 1). Диапазон регулирования скорости привода перемещения электрода-инструмента (от 0 до 146 мм/мин) для обработки внутренних поверхностей обеспечивает возможность точного управления временем воздействия на определенный участок обрабатываемой поверхности. Вид струи электролита, формируемой на выходе из электрода-инструмента при обработке внутренней поверхности образца, представлен на рисунке 2.



Рисунок 1 – Внешний вид оборудования для получения МДО покрытий на внутренних поверхностях трубчатых изделий



Рисунок 2 – Струя электролита, формируемая на выходе из электрода-инструмента

В качестве образцов использовались отрезки труб из алюминиевого сплава АМг2  $\varnothing 25 \times 1$  длиной 100 мм. Для исследования режимов МДО использовался базовый электролит на основе силиката натрия ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  – 1%) и гидроксида калия (КОН – 0,2%). Для получения светопоглощающих МДО покрытий в электролит добавлялись компоненты, обеспечивающие в условиях высокотемпературных плазменных процессов на обрабатываемой поверхности окрашивание оксидного слоя в темные цвета – молибдат натрия и ферроцианид калия.

МДО внутренних поверхностей образцов выполнялось в анодно-катодном режиме с бестоковой паузой при амплитуде анодного импульса до 520 В и катодного импульса до 200 В. В зависимости от режимов в результате обработки формировались покрытия с различной структурой и свойствами, которые отличались морфологией, твердостью, прочностью сцепления с подложкой, цветом. Установлено, что наиболее прочное и равномерное черное покрытие формируется при следующих электрических режимах: соотношение положительного и отрицательного импульсов – 3:1, амплитуда положительного импульса – 300–350 В, коэффициент заполнения положительного импульса – 25%.