

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 37-ой Международной научно-технической конференции  
в рамках международной специализированной выставки  
«Металлообработка–2023»

(Минск, 6 апреля 2023 г.)

Минск  
БНТУ  
2023

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, 6 апреля 2023 г.) / редкол.: В.К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2023. – 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 37-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, 2023  
© БНТУ, 2023  
© ГНПО «Центр»  
© МИНСКЭКСПО, 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

Ажар А.В., Колесников Л.А., Мухиддинов З.И., Яцкевич О.К. Имитационное моделирование процесса обработки осевым инструментом	5
Акулович Л.М., Миранович А.В., Афанасенко Д.Е. Физико-механические свойства и качество покрытий, полученных комбинированными способами упрочняющей обработки	7
Болобанова Н.Л., Ермушин Д.Ю. Моделирование поверхностного деформационного упрочнения инструмента при широкополосной прокатке	10
Данилов А.А. Обработка наружных профильных моментопередающих поверхностей пластическим деформированием	12
Данилов А.А. Реализация схем обработки профильных поверхностей резанием на универсальных станках	14
Данилов В.А. Методы управления формообразованием сложных поверхностей резанием	16
Данилов В.А. Обеспечение интенсификации обработки сложнопрофильных поверхностей при функциональном проектировании технологий формообразования	18
Девойно О.Г., Поляков А.Н., Володько А.С., Горбунов А.В. Интенсификация плазменного напыления металлических и оксидных покрытий на изделия машиностроительного и медицинского назначения с использованием ввода углеводородных добавок	20
Девойно О.Г., Шелег В.К., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Пилецкая Л.И. Микротвердость в единичных валиках из никелевого сплава после лазерной наплавки волоконным лазером	24
Довнар С.С., Яцкевич О.К., Резник С.В., Шведова Д.Н., Аглушевич И.Ю. МКЭ-анализ усиления многоцелевого станка клиновидными структурами из полимербетона	26
Дубенец С.С. Разработка клинового инструмента с переменным углом наклонной деформирующей поверхности при обратной поперечно-клиновой прокатке	30
Евстафиева С.В., Грубляк В.Я. Применение воксельных моделей для визуализации обработки при помощи цифровой тени системы ЧПУ	31
Исаев А.В., Белоцкий А.С. Разработка программного симулятора шлифовально-заточного станка с ЧПУ для изготовления режущего инструмента концевое типа	33
Королёв А.Ю., Нисс В.С., Паршутто А.Э., Сорока Е.В. Влияние режимов импульсной электролитно-плазменной обработки на съём металла	35
Королёв А.Ю., Сенченко Г.М., Нисс В.С., Алексеев Ю.Г., Иванов А.И. Исследование характеристик процесса электролитно-плазменного нагрева при модифицировании поверхности титановых сплавов	37
Кротова Н.А., Евстафиева С.В. Разработка методов планирования траектории перемещения рабочего инструмента при помощи системы технического зрения	39

Крюков С.А., Шумячер В.М. Повышение эффективности шлифования путем управления структурно-механическими характеристиками абразивного инструмента	41
Леванцевич М.А., Максимченко Н.Н., Пилипчук Е.В. Триботехнические свойства покрытий из порошковых композитов, сформированных методом ДПГИ	43
Миранович А.В., Акулович Л.М. Исследование износостойкости поверхностей упрочненных комбинированными способами обработки в электромагнитном поле	45
Мирзомахмудов А.Р., Исаев А.В. Проектирование конструкций сборных фасонных фрез для обработки железнодорожных изделий	47
Михайлов М.И., Лапко О.А., Михайлов К.М. Исследование влияния состава композиционного материала на основе полимеров на их жесткость	50
Нисс В.С., Королёв А.Ю., Алексеев Ю.Г., Паршутто А.Э. Влияние высокочастотного микродугового оксидирования титана на структуру формируемых покрытий	52
Нисс В.С., Королёв А.Ю., Алексеев Ю.Г., Сенченко Г.М., Янович В.А. Структура и свойства черных МДО-покрытий на алюминиевых сплавах	54
Околов А.Р., Груша Ю.А. Современные тренды мировой промышленной автоматизации и роботизации	56
Попок Н.Н., Хмельницкий Р.С., Анисимов В.С., Гвоздь Г.И., Бабашинский М.А. Экспериментальные исследования комбинированных торцово-дисковых фрез	58
Пушков Р.Л., Седьмов А.Э. Применение hardware-in-the-loop подхода для разработки доверенных систем управления	61
Пушков Р.Л., Стрешина М.С. Применение виртуальной модели исполнительного механизма для отладки программ электроавтоматики	63
Романов В.Б., Троицкий А.К. Разработка конструкции узла крепления сменной многогранной пластины в корпусе резцовой головки	64
Сакович Н.А. Повышение износостойкости и изменение микроструктуры металлопокрытий после применения поверхностной высокотемпературной термомеханической обработки	66
Синькевич Ю.В. О механизме сглаживания шероховатости поверхности при электроимпульсном полировании металлов и сплавов	68
Соколовский С.С., Соломахо В.Л. Концептуальная модель системы автоматизированного проектирования оптимизированных методик выполнения измерений геометрических параметров деталей	72
Старовойтов Н.А., Рогов С.В. Системы автоматизированного написания и тестирования управляющих программ с помощью САМ приложений к КОМПАС 3D и эмуляторов систем ЧПУ ООО Балт-Систем	74
Хлыстов Е.О., Исаев А.В. Проектирование сборных торцово-цилиндрических фрез	77
Шумячер В.М., Крюков С.А., Савчиц А.В. О физической сущности обрабатываемости металлов шлифованием	79
Шумячер В.М., Крюков С.А., Яцкевич О.К. Физико-механические и химические процессы стружкообразования при шлифовании металлов	80

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ОСЕВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Ажар А.В.<sup>1</sup>, Колесников Л.А.<sup>1</sup>, Мухиддинов З.И.<sup>2</sup>, Яцкевич О.К.<sup>1</sup>

1. Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

2. Ташкентский государственный технический университет имени Ислама  
Каримова, Ташкент, Узбекистан

Выбор режимов обработки в условиях современного автоматизированного производства заметно усложнился. Традиционный и понятный критерий – производительность резания – становится только одним из критериев выбора режимов резания. Пока стоимость станков и инструментов была сравнительно низкой, такой подход был приемлем. Но современное оборудование предназначено для работы в режиме 7/24, и его простой из-за поломки или износа инструмента обходится очень дорого, даже в условиях отечественного производства. Поэтому приходится учитывать все аспекты его работы, например, изменение свойств СПИД в процессе работы, вероятностный характер самого процесса резания и т.д. Наиболее естественным методом анализа в этих условиях является имитационное моделирование, позволяющее относительно просто учесть все эти аспекты.

В качестве простейшего примера имитационного моделирования рассмотрим обработку твердосплавным осевым инструментом тестовой детали (рисунок 1) из серого чугуна (НВ 180,  $k_c=600$  Н/мм<sup>2</sup>). Обработка заключается в цековании 12 отверстий  $\varnothing 32 \times 10$ , сверлении 12 отверстий  $\varnothing 18 \times 30$  мм и фаски  $2 \times 45^\circ$  на этих отверстиях; 12 отверстий  $\varnothing 16 \times 50$  мм и фаски  $1.6 \times 45^\circ$  на этих отверстиях. Принимаем осевую подачу  $S=0,25$  мм/об, скорость быстрых перемещений станка  $V_{xx}=15$  м/мин, безопасное расстояние – 50 мм от плоскости обработки, расстояние подвода инструмента на рабочей подаче – 6 мм.

Модель поочередно воспроизводит процесс обработки каждым инструментом соответствующей поверхности. При этом учитывается как основное, так и вспомогательное время обработки (позиционирование инструмента по координатам отверстий, подвод к обрабатываемой поверхности, вывод инструмента и т.д.), износ инструмента после каждого прохода, повышение крутящего момента из-за затупления режущей кромки и еще ряд параметров.

В качестве примера использования результатов имитационного моделирования можно привести выбор скоростей резания при обработке партии изделий заданного размера (100 штук) из условия равенства ресурса работы инструментов  $\varnothing 32$  мм,  $\varnothing 18$  мм,  $\varnothing 16$  мм. На рисунке 2 приведен график изменения числа обработанных тестовых деталей каждым инструментом в диапазоне скоростей резания 50...125 м/мин. Например, для сверла  $\varnothing 18$  мм и

Ø16 мм одинаковый ресурс работы будет при скорости резания, соответственно, 79 и 63 м/мин.

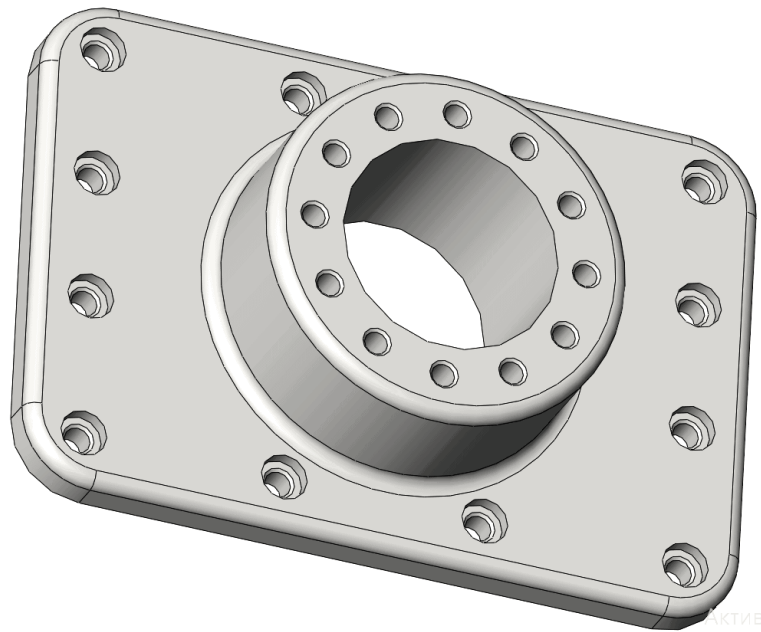


Рисунок 1 – Тестовая деталь

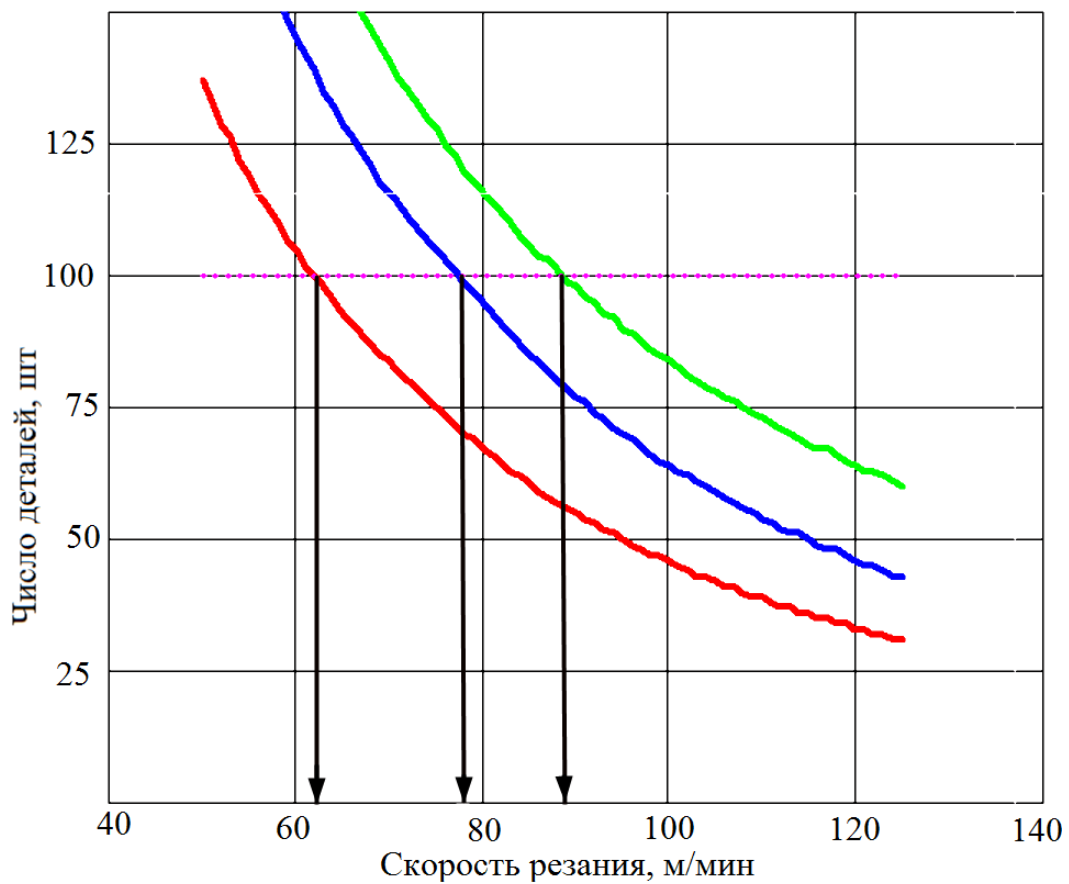


Рисунок 2 – Порядок выбора скорости резания для инструментов Ø32 мм, Ø18 мм, Ø16 мм при обработке 100 тестовых деталей

## **ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И КАЧЕСТВО ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ КОМБИНИРОВАННЫМИ СПОСОБАМИ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ**

**Акулович Л.М., Миранович А.В., Афанасенко Д.Е.**

Белорусский государственный аграрный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

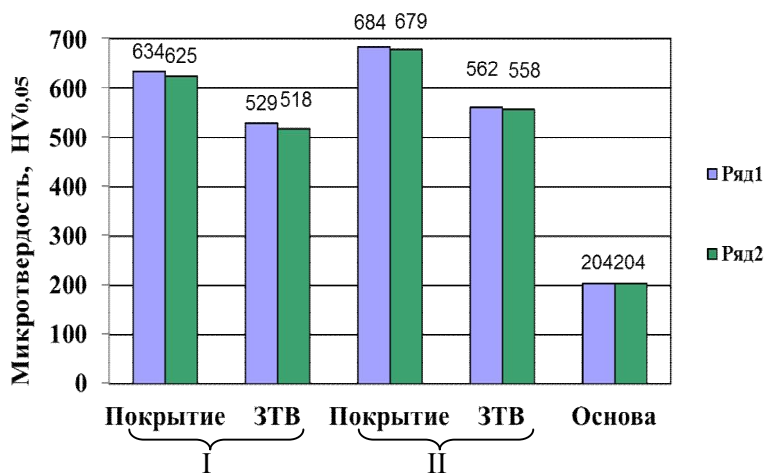
Повышение эффективности использования техники, экономии материальных и топливно-энергетических ресурсов возможно за счет внедрения в производство комбинированных способов упрочняющей обработки, реализация которых обеспечивается посредством одновременного или последовательного воздействия на поверхности деталей несколькими видами энергии, например, электрической и магнитной, тепловой и механической [1, 2]. К числу таких технологий относится способ магнитно-электрического упрочнения (МЭУ) с поверхностным пластическим деформированием (ППД), наряду с преимуществами (простота и экологичность метода, компактность и относительно низкая стоимость оборудования), присущи и недостатки, ограничивающие область его применения (невысокие физико-механические свойства формируемых покрытий: разнотолщинность, присутствие в них микротрещин, раковин и пустот, значительная шероховатость упрочненной поверхности) [2, 3]. Для устранения указанных дефектов, увеличения прочностных и триботехнических характеристик упрочненных поверхностей, предложено совмещать в одной технологической схеме с МЭУ термомеханическую обработку (ТМО), обеспечивающую термомодеформационное воздействие на формируемые покрытия из композиционных ферромагнитных порошков (КМП) [3].

**Цель исследований:** выполнить сравнительный анализ параметров качества и микротвердости поверхностных слоев, полученных комбинированными способами магнитно-электрического упрочнения с ППД и ТМО.

Исследования проводились на цилиндрических образцах из стали 45 с покрытиями, полученными нанесением паст, состоящих из КМП (ФБХ-6-2, Р6М5Ф3) и связующего (эпоксидная смола ЭДП, растворенная в жидком стекле (ТО РБ 02974150 – 015 – 99), и последующей их обработкой МЭУ с ППД и МЭУ с ТМО. Упрочнение поверхностей выполнялось на оптимальных режимах [1, 2]: МЭУ – на установке модели УМЭУ-1; ППД – накатным устройством с шариковым электродом-инструментом; ТМО – накатным устройством с роликовым электродом-инструментом и пропусканием в зоне контакта технологического тока силой 0,5 кА. Толщина упрочненных поверхностных слоев определялась по распределению микротвердости на приборе ПМТ-3М; разнотолщинность – по разности максимальной и минимальной местных

толщин покрытий образца; объемная пористость покрытий – методом гидростатического взвешивания. Измерение шероховатости поверхности производилось на профилографе-профилометре Mitutoyo SJ-201P.

**Обсуждение результатов.** Установлено, что наибольшее значение средней микротвердости (рисунок) наблюдается у покрытий из КМП ФБХ-6-2, полученных МЭУ с ТМО, и составляет  $684 \text{ HV}_{0,05}$ , что на 7,3% больше микротвердости покрытий, полученных МЭУ с ППД ( $634 \text{ HV}_{0,05}$ ), и в 3,4 раза больше по сравнению с материалом основы ( $204 \text{ HV}_{0,05}$ ). Обусловлено это формированием мелкодисперсной структуры нанесенных слоев в результате их разогрева, пластического деформирования и последующего скоростного охлаждения.



Ряд: 1 – КМП ФБХ-6-2; 2 – КМП Р6М5Ф3;  
ЗТВ – зона термического влияния

Рисунок – Диаграмма результатов исследований микротвердости упрочненных поверхностей МЭУ с ППД (I), МЭУ с ТМО (II)

ФБХ-6-2 максимальная микротвердость объясняется присутствием в структуре слоев закалочного мартенсита и комплексных боридов хрома, ферроборида, боридов на основе железа. Выявлено, что незначительные колебания и плавное изменение значений микротвердости по толщине покрытий из КМП ФБХ-6-2 и Р6М5Ф3 обусловлены однородностью и плотностью нанесенных слоев.

Результаты исследований (таблица) показывают, что ТМО по сравнению с ППД нанесенных слоев МЭУ при уменьшении средней их толщины до 5,3%, позволяет повысить качество упрочненных поверхностей за счет снижения их объемной пористости в 1,5–2,0 раза, средней шероховатости по параметру  $Ra$  до 20% и средней разнотолщинности до 1,1 раза.

Следует отметить, что после ТМО микротвердость покрытий из КМП ФБХ-6-2 и Р6М5Ф3 повышается на 5–10%, что объясняется равномерным распределением по обрабатываемой поверхности расплава материала порошков, уменьшением концентрации остаточного аустенита (частичным превращением аустенита в мартенсит), выделением дисперсных карбидов. Так, для покрытия из КМП



Таблица – Показатели качества упрочненных поверхностей

Материал ФМП	Средняя толщина покрытий, мкм	Средняя разнотолщинность покрытий, мкм	Объемная пористость покрытий, %	Средняя шероховатость поверхности, мкм
Магнитно-электрическое упрочнение с ППД				
Р6М5Ф3	239	46	1,8	6,4
ФБХ-6-2	244	38	1,6	5,8
Магнитно-электрическое упрочнение с ТМО				
Р6М5Ф3	228	41	1,2	5,2
ФБХ-6-2	232	34	0,8	4,6

**Выводы.** В результате выполненных исследований установлено:

1. ТМО покрытий, полученных МЭУ, позволяет увеличить микротвердость покрытий на 7,3% по сравнению с обработанными поверхностями МЭУ с ППД.

2. ТМО по сравнению с ППД нанесенных покрытий МЭУ позволяет уменьшить среднюю их толщину до 5,3%, снизить их объемную пористость в 1,5 – 2,0 раза, среднюю шероховатость по параметру *Ra* до 20% и среднюю разнотолщинность до 1,1 раза.

1. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Полоцк : ПГУ, 1999. – 240 с.
2. Акулович, Л.М. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники / Л.М. Акулович, А.В. Миранович. – Минск : БГАТУ, 2016. – 236 с.
3. Акулович, Л.М. Методика синтеза комбинированных способов упрочнения поверхностей деталей в магнитном поле наплавки / Л.М. Акулович, А.В. Миранович, В.Г. Мисько // Машиностроение: респ. межведомств. сб. науч. тр. – Минск : БНТУ, 2022. – Вып. 34. – С. 5 – 12.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ПРОКАТКЕ

**Болобанова Н.Л.<sup>1,2</sup>, Ермушин Д.Ю.<sup>1</sup>**

1) Череповецкий государственный университет,  
Череповец, Российская Федерация

2) Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН  
Москва, Российская Федерация

Листопрокатные валки являются основным деформирующим инструментом, определяющим процесс формообразования широкой стальной полосы. Самой распространенной валковой системой была и остается система кварто, включающая опорные валки большого диаметра и рабочие валки меньшего диаметра (рисунок 1).



Рисунок 1 – Валковая система  
кварто

На основе зарубежного опыта эксплуатации непрерывных широкополосных станов с 2002 г. ПАО «Северсталь» применяет опорные валки с рабочим слоем из стали, содержащей 5% Cr [1]. Глубина рабочего слоя бочки с постоянной твердостью достигает 15% номинального диаметра валка. Эксплуатация таких валков включает чередование их работы по клетям стана в контакте со смежным рабочим валком с перешлифовками для снятия поврежденного слоя до полной выработки рабочего слоя. Нарработка

опорного валка может превышать 10 млн т, срок его эксплуатации доходит до 5 лет. Опорные валки последнего поколения характеризуются незначительным износом, и основным критерием при определении величины съема с таких валков во время перешлифовки становится требование по удалению наклепа бочки. В этом случае твердость бочки после шлифовки не должна превышать 2–3 HSD по сравнению с исходной твердостью бочки опорного валка, измеренной перед началом его эксплуатации на стане [2]. Для достижения высокой наработки валка и увеличения тоннажности прокатной кампании важно установить закономерности поверхностного деформационного упрочнения бочки опорных валков при прокатке различного объема металла с разной скоростью и другими показателями процесса прокатки.

Моделирование упрочнения бочки опорного валка для экономии времени расчета выполнено в 2D-постановке в зависимости от числа контактов с

рабочим валком, определяемым путем обработки данных, фиксируемых автоматической системой измерения и контроля параметров прокатки. При средней тоннажности кампаний 275 тыс. т число циклов контакта в первой клети чистовой группы непрерывного широкополосного стана горячей прокатки составляет  $0,3 \cdot 10^6$ , что соответствует прокатке полос длиной 1440 км, средняя погонная нагрузка в межвалковом контакте равна 1,14 т/мм. Последняя

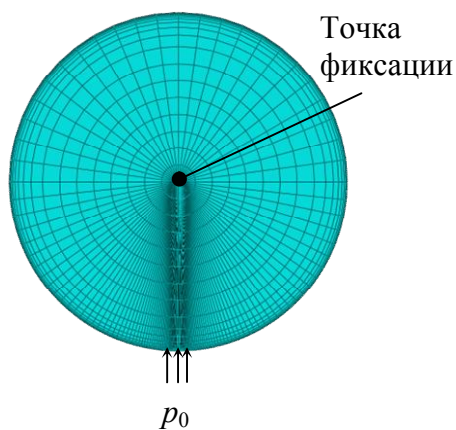


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель опорного вала

клеть характеризуется числом циклов –  $1,74 \cdot 10^6$ , длиной полос 8280 км и погонной нагрузкой в контакте – 0,5 т/мм. Диаметр бочки опорного вала равен  $D_{оп} = 1500$  мм, свойства материала рабочего слоя бочки вала получены в программном комплексе JMatPro. Упругопластическая модель бочки опорного вала (рисунок 2) нагружена нормальным давлением  $p_0$  со стороны контакта с рабочим валком от действия усилия прокатки. Для реализации циклов контакта межвалковое давление задавалось в виде графика

гармонических колебаний по закону косинуса.

После обработки результатов численного эксперимента с помощью обобщенного метода наименьших квадратов и имеющихся исследований зависимости между твердостью и напряжением деформируемого тела на основе получения тарировочных графиков «твердость – напряжения» при испытаниях на сжатие [3] было получено выражение приращения твердости бочки вала в зависимости от работы в  $i$ -ой клети чистовой группы за прокатную кампанию:

$$\Delta HSD_i = -1,1158 + 0,0006926 \cdot L_{пи} + 3,0258 \cdot q_i, \quad (1)$$

где  $L_{пи}$  – длина прокатанной полосы в  $i$ -ой клети, км;  $q_i$  – средняя погонная нагрузка в межвалковом контакте  $i$ -ой клети, т/мм. Значения коэффициента корреляции составило  $r = 0,99$ .

Для качественной оценки критерия приращения твердости бочки (1) была реализована серия промышленных экспериментов по измерению упрочнения бочек валков по клетям стана. Степень соответствия значений фактического и рассчитанного приращения твердости бочки опорного вала по клетям стана составила  $R^2 = 87,2\%$ , средняя погрешность – 11,4%. Зависимость (1) предложено использовать для определения допустимого объема кампании опорных валков и величины съема рабочего слоя при шлифовке.

1. Гостев К. Современные валки на станах 2000 Череповецкого и Магнитогорского металлургических комбинатов // Металлург. – 2008. – № 9. – С. 52–55.
2. Хайстеркам П., Шнайдер З., Джи В. Расширяя пределы возможностей материалов опорных валков // Сталь. – 2019. – № 11. – С. 26–33.
3. Богомолов Ю.С., Дель Г.Д., Седоков Л.М. Зависимость между твердостью и напряжением деформируемого тела // Известия Томского политехнического института им. С.М. Кирова. – 1966. – Т. 147. – С. 14–17.

**УДК 621.91.04**

## **ОБРАБОТКА НАРУЖНЫХ ПРОФИЛЬНЫХ МОМЕНТОПЕРЕДАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ**

**Данилов А.А.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Характерным для профильных соединений является высокий уровень напряжений на наиболее нагруженных участках их сопряженных поверхностей, поэтому технология их обработки должна обеспечивать повышенную контактную жесткость неподвижных и износостойкость подвижных соединений за счет упрочнения. При выборе метода и схемы упрочнения профильных поверхностей принимается во внимание, что сложность их геометрии обуславливает необходимость применять методы их упрочнения, после которых не требуется дополнительная обработка изделий. Этому требованию отвечают, например, методы поверхностного пластического деформирования (ППД).

Существенным технологическим преимуществом профильных моментопередающих поверхностей по сравнению со шлицевыми является возможность их упрочнения теми же методами ППД, что и круглых поверхностей. Возможность реализации этого преимущества должна обеспечиваться технологией изготовления деталей профильного соединения, в частности, комплексной их обработкой резанием и ППД. Совмещение процессов резания и ППД позволяет повысить качество обработки моментопередающих поверхностей и улучшить эксплуатационные характеристики профильного соединения, что обуславливает актуальность разработки соответствующих схем формообразования и средств их реализации.

Для упрочняющей обработки ППД поверхностей с Рело-профилем требуются соответствующие инструменты и станочное оборудование. Для стабилизации эксплуатационных свойств на всей обработанной поверхности важно обеспечить постоянство усилия взаимодействия с ней рабочего элемента

инструмента, что возможно при его перемещении по траектории, эквидистантой или близкой по форме к профилю этой поверхности. Поэтому предпочтительны схемы обработки ППД, которые по кинематике соответствуют схемам их обработки резанием. В этом случае обработка ППД может выполняться после обработки резанием на том же станке соответствующим инструментом, например, аналогично широко применяемой комплексной обработке круглых поверхностей на токарных станках, что важно для минимизации затрат на производство профильных соединений.

При выборе станка для обработки ППД поверхностей с Рело-профилем следует учитывать, что он технически просто формируется полигональным методом (рисунок 1, а) при сообщении заготовке 1 и инструменту 2 одинаково направленных вращательных движений  $B_1$  и  $B_2$  с равными угловыми скоростями [1]. В этом случае вершина  $M$  рабочего элемента 3 инструмента перемещается по дуге  $de$ , ограничивающей сторону Рело-профиля. Аналитически установлено, что при значении радиуса инструмента  $R = \frac{b}{\sqrt{3}}$  с тремя равномерно расположенными по окружности рабочими элементами 3 формируется треугольник Рело шириной  $b$ .

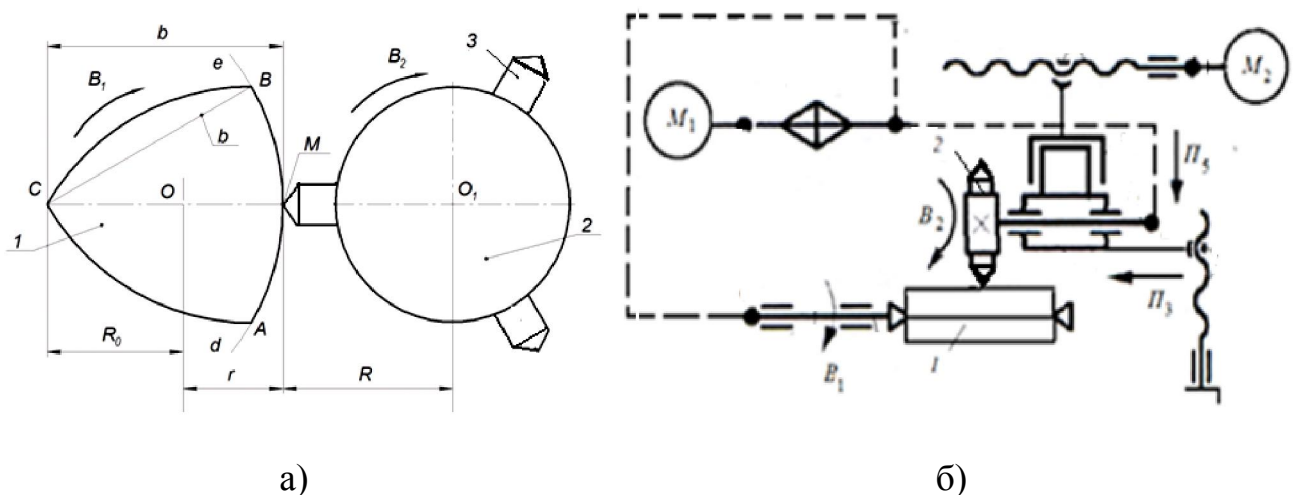


Рисунок 1 – Схема полигонального формирования Рело-профиля при ППД (а) и кинематическая структура реализующего ее специального станка (б)

Требуемое усилие контакта рабочих элементов инструмента с упрочняемой поверхностью и его стабилизация обеспечиваются конструкцией инструмента с упругими элементами, под действием которых рабочие элементы перемещаются в радиальном направлении и взаимодействуют с вращающейся заготовкой.

Формообразующая система специального станка для обработки поверхностей с Рело-профилем ППД по схеме полигонального формирования (рисунок 1, б) содержит кинематические группы движений профилирования  $\Phi_v(B_1B_2)$ , подачи  $\Phi_s(\Pi_3)$  и установки  $U_{ст}(\Pi_4)$ , создающие необходимые относительные перемещения заготовки и инструмента. редставленная на рисунке 1, б кинематическая структура аналогична частной кинематической

структуре отечественного широкоуниверсального зубошлицефрезерного станка модели ВС50, настроенного на полигональное точение [1], что позволяет обрабатывать на нем моментопередающие поверхности с профилем в виде треугольника Рело поверхностным пластическим деформированием.

1. Данилов, А.А. Анализ и реализация схем полигонального точения многогранных поверхностей / А.А. Данилов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. – Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 11, с. 19-27.

**УДК 621.91.04**

## **РЕАЛИЗАЦИЯ СХЕМ ОБРАБОТКИ ПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РЕЗАНИЕМ НА УНИВЕРСАЛЬНЫХ СТАНКАХ**

**Данилов А.А.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Профильные моментопередающие соединения по сравнению со шлицевыми соединениями имеют существенные преимущества по усталостной прочности, уровню шума и другим эксплуатационным характеристикам при меньшей до 50% себестоимости. Для их изготовления за рубежом применяют специализированные станки, которые в СНГ не производятся, что сдерживает применение профильных соединений в отечественном машиностроении. В этой связи актуально применение для обработки профильных поверхностей универсальных станков иного назначения за счет расширения их технологических возможностей.

Рекомендуемый вариант выбора универсального станка для обработки профильной поверхности заданным методом формообразования включает следующие этапы:

- разработать схему обработки заданной поверхности, например, с профилем в виде треугольника Рело, в соответствии с принятым методом ее формообразования;
- установить настраиваемые параметры исполнительных движений и соответствующие органы настройки;
- разработать типовую кинематической структуру формообразующей системы станка для реализации принятой схемы обработки;
- на основе анализа кинематики и компоновки известных универсальных станков установить соответствие их кинематической структуры разработанной структуре специального станка и выбрать из них станок, обеспечивающий возможность формообразования заданной поверхности и настройки соответствующими органами параметров исполнительных движений;

- на основе анализа технологических возможностей выбранного станка установить необходимость оснащения его дополнительными устройствами, например, для выполнения не реализуемой станком функции деления при обработке поверхностей с периодически повторяющимся профилем;

- исходя из формы и расположения производящих элементов инструмента разработать его конструктивную схему или обосновать возможность применения универсального инструмента для обработки на станке заданной поверхности реализуемым методом;

- уточнить параметры схемы обработки заданной поверхности с учетом конструктивных и кинематических особенностей используемого станка, инструмента и дополнительных устройств.

Для реализации технологии формообразования заданной поверхности на выбранном станке определяются также режимные параметры схемы обработки и выполняется экспериментальная проверка ее осуществимости на этом станке.

В соответствии с изложенным разработаны варианты реализации различных методов формообразования профильных поверхностей на универсальных станках. Рассмотрим вариант решения задачи выбора станка для обработки наружной поверхности с профилем в виде треугольника Рело (Рело-профилем), формируемой сочетанием метода огибания окружностью и метода следа [1] (рисунок 1, а).

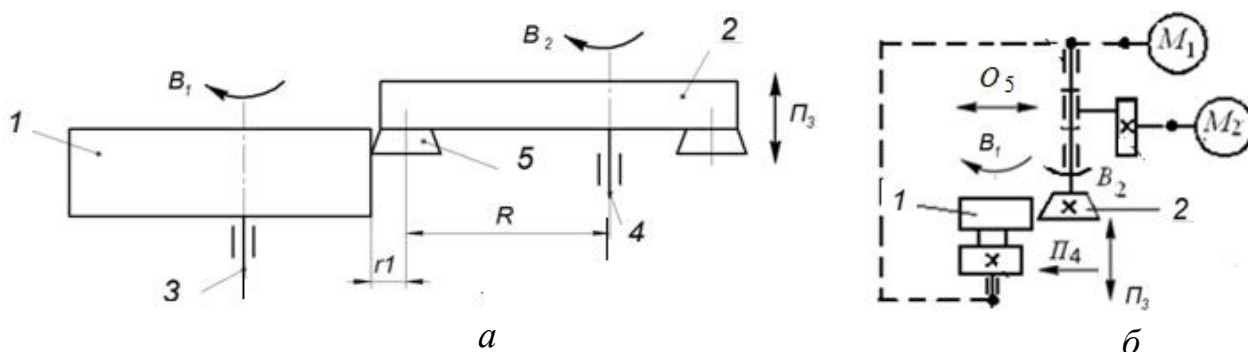


Рисунок 1 – Схема обработки поверхности с Рело-профилем (а) и кинематическая структура станка для ее реализации (б)

Для формирования Рело-профиля методом огибания заготовке 1 (рисунок 1, а) и инструменту 2 сообщают одинаково направленные вращательные движения  $B_1$  и  $B_2$  с равными угловыми скоростями вокруг параллельных осей 3 и 4. Для формирования поверхности по длине методом следа инструменту 2 сообщают вдоль нее движение  $P_3$  со скоростью резания.

Инструмент имеет три круглых режущих лезвия 5 радиусом  $r_1$ , центры которых равномерно расположены по окружности радиусом  $R$ . Такая конструктивная схема режущего инструмента обусловлена тем, что Рело-профиль формируется методом огибания производящей окружностью, имеет три конгруэнтные стороны, а угловые скорости инструмента и заготовки равны.

Кинематическая структура формообразующей системы специального станка для реализации схемы обработки (рисунок 1, б) содержит

кинематические группы: главного движения  $\Phi_v(\Pi_1)$  для формирования поверхности по длине; движения профилирования  $\Phi_s(B_2B_3)$ , движения врезания  $Bp(\Pi_4)$  и вспомогательного движения отскока  $Bcn(O_5)$ . Аналогичную кинематическую структуру имеют универсальные зубодолбежные станки обкатного типа, что позволило реализовать технологию формообразования наружных моментопередающих поверхностей с Рело-профилем на зубодолбежном станке.

1. Способ обработки некруглых деталей с треугольным профилем равной ширины: Евразийский патент 031383 / А.А. Данилов, В.А. Данилов. – Оpubл. 28.12.2018.

**УДК 621.91.04**

## **МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЕМ СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РЕЗАНИЕМ**

**Данилов В.А.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Формообразование сложной поверхности осуществляется в результате относительного движения инструмента и заготовки (движения формообразования) и срезания с нее слоя металла. Производящие элементы инструмента в процессе обработки контактируют непрерывно или периодически с номинальной поверхностью изделия, осуществляя обычно частичное (неполное) формообразование с допускаемыми отклонениями обработанной поверхности от номинальной. Поэтому одна из задач управления формообразованием сложных поверхностей – минимизация этих отклонений до допустимых значений для обеспечения требуемой точности обработки.

Вторая задача управления формообразованием – обеспечение рациональных условий резания, в частности, путем стабилизация значений рабочих углов режущих лезвий при обработке поверхностей с переменной кривизной производящих линий.

Третья задача – формирование топологии обработанной поверхности, т.е. формы и размеров ее отклонений («ячеек формообразования» [1]) от номинальной поверхности в виде не срезанной части припуска, обусловленных схемой формообразования поверхности и определяющих микрорельеф обработанной поверхности.

Четвертая задача – повышение производительности формообразования (площади поверхности, обрабатываемой в единицу времени) за счет параметров схемы и цикла обработки.



Управление формообразованием возможно геометрическим, кинематическим, цикловым и комбинированным методами [2].

*Геометрические методы* позволяют управлять формой и взаимным расположением производящих линий с целью обеспечения требуемой точности формообразования. Поскольку она зависит от соответствия формы характеристического образа инструмента и траектории движения формообразования производящим линиям номинальной поверхности, то при синтезе схемы формообразования важны выбор и обеспечение его геометрических параметров. Задача решается на основе исследования геометрии этой поверхности.

В процессе обработки характеристический образ инструмента может трансформироваться дискретно или непрерывно, например, за счет соответствующего изменения его положения относительно траектории движения формообразования [3]. Такое управление характерно при обработке сложных поверхностей (лопаток турбин, штампов и т.п.) на станках с ЧПУ.

*Кинематические методы* управления формообразованием основаны на изменении в процессе обработки скоростей движений исполнительных органов, создающих сложное движение формообразования. Закономерности изменения скорости этих движений определяются аналитически, исходя из геометрии номинальной поверхности и условия постоянства скорости движения формообразования на всей ее площади. Регулированием по установленным зависимостям скоростей движений исполнительных органов станка, несущих инструмент и заготовку и образующих движения формообразования, обеспечивается требуемое соответствие обработанной и номинальной поверхностей (точность формообразования). Возможность реализации кинематических методов управления необходимо предусмотреть при синтезе кинематической структуры и проектировании кинематики станка.

Универсальным кинематическим методом управления формообразованием является сообщение инструменту или его элементам с режущими лезвиями дополнительного перемещения в направлении к обрабатываемой поверхности для формирования траектории движения формообразования в соответствии с геометрией заданной поверхности. Это позволяет обеспечить полное формообразование поверхности, при котором обработанная поверхность конгруэнтна номинальной поверхности [3].

*Цикловой метод* управления формообразованием предусматривает задание количества и относительного расположения производящих элементов инструмента, а также направления движения формообразования относительно обрабатываемой поверхности, в частности, при ее обработке строчками, так как от их геометрии и ориентации существенно зависят точность, непрерывность и производительность формообразования. Поэтому возможность управления положением строчек на обрабатываемой поверхности должна быть обеспечена при разработке компоновки и обрабатывающей системы станка.

В общем случае задача управления формообразованием решается путем совместного применения возможных методов управления, т.е. комбинированным методом.

На рассмотренных методах управления формообразованием основаны признанные изобретениями способы обработки изделий со сложными поверхностями, для реализации которых созданы соответствующие станки [3].

1. Радзевич, С.П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории / С. П. Радзевич. – Киев: Растан, 2001. – 592 с.
2. Данилов, В.А. Научные основы технологии формообразования сложных поверхностей резанием: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01, 05.02.08 / В.А. Данилов. – Минск, 2002. – 50 с.
3. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларус. навука, 2014. – 316 с.

**УДК 621.91.04**

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ФУНКЦИОНАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ**

**Данилов В.А.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Сложные поверхности широко применяются в конструкциях деталей машин и приборов, движителей, энергетических установок, различных инструментов. Основным методом их обработки служит формообразование резанием, которое, благодаря управляемости и гибкости обеспечивает экономичным путем требуемое качество изделий машиностроения. Техничко-экономические показатели технологий формообразования изделий со сложными поверхностями обычно ниже, чем деталей простой геометрической формы, поэтому интенсификация процессов их обработки является актуальной задачей.

Многообразие применяемых в технике сложных поверхностей обуславливает потребность в универсальных принципах синтеза эффективных методов их формообразования, создания станочного оборудования и режущих инструментов – основных компонентов технологий формообразования.

Из возможных направлений решения этой задачи важная роль принадлежит функциональному проектированию обрабатывающей системы (станка и режущего инструмента), так как допущенные здесь ошибки не могут быть компенсированы на последующих стадиях их конструирования, технологической

подготовки и организации производства. Первостепенное значение при функциональном проектировании имеют синтез метода формообразования поверхности, как совокупности методов формирования ее производящих линий (образующей и направляющей), схемы ее обработки и кинематической структуры станка, определяющих совершенство технологии формообразования.

Эффективность метода формообразования поверхности характеризуется, как количественными (производительность, точность), так и качественными (универсальность, сложность реализации) показателями [1]. В частности, учет сложности реализации важен при использовании в разрабатываемой технологии формообразования станка иного назначения, например, токарно-затыловочного для обработки профильных цилиндрических и круговых винтовых поверхностей [1].

К основным путям интенсификации технологий формообразования, реализуемыми на стадии функционального проектирования, относятся: обоснование общей схемы обработки; рациональное распределение функции формообразования между инструментальной и кинематической подсистемами; оптимизация кинематики формообразования и кинематической схемы обработки; создание или выбор эффективного метода обработки; оптимизация кинематической структуры формообразующей системы станка; обеспечение возможности управления процессами формообразования и резания.

Общая схема обработки, т.е. форма характеристического образа инструмента и направление его перемещения относительно заготовки, принимается исходя из влияния ее параметров на технологическую производительность и точность формообразования.

При обосновании распределения функции формообразования между инструментом и кинематикой станка учитывается, что при перенесении функции формообразования на инструмент кинематика станка упрощается, однако усложняется форма производящих элементов инструмента. Важность синтеза рациональной кинематики формообразования обусловлена тем, что она, как основа кинематической схемы обработки, в значительной степени влияет на сложность кинематики, производительность и универсальность станка.

К основным принципам синтеза кинематики формообразования относятся: синтез структуры исполнительных движений, обеспечивающей благоприятные условия резания и работы механизмов станка за счет исключения реверсивных движений исполнительных органов, замены их вращательными; совмещение исполнительных движений для упрощения кинематической схемы обработки; введение движений для стабилизации условий резания, управления точностью формообразования или условиями резания; задание рационального сочетания скоростей и направлений элементарных движений, их рационального распределения между исполнительными органами станка.

Современным направлением интенсификации технологий формообразования за счет применения эффективных методов обработки является использование концентрированных потоков энергии, например, в виде электронного, лазерного луча, струи плазмы, жидкости (чистой или в смеси с

абразивом), электроискрового, электродугового разряда и т.д. Такой поток энергии может быть дополнительным источником воздействия на материал заготовки в схемах обработки резанием (комбинированная обработка) с целью улучшения его обрабатываемости или основным источником воздействия (газопламенная, плазменная, лазерная, гидроабразивная резка и т.д.).

С использованием изложенных принципов интенсификации процессов обработки разработаны реализованные в промышленности технологии формообразования различных поверхностей (некруглых цилиндрических, винтовых, с зубчатым контуром и др.), позволившие освоить производство импортозамещающих изделий [1, 2].

1. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларус. навука, 2014. – 316 с.
2. Данилов, В.А. Прогрессивные технологии формообразования торцовых зубчатых контуров деталей машин / В.А. Данилов, Р.А. Киселев, О.В. Яловский. – Новополоцк: УО ПГУ, 2015. – 220 с.

**УДК 621.793 : 621.365**

## **ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИЗДЕЛИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО И МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВВОДА УГЛЕВОДОРОДНЫХ ДОБАВОК**

**Девойно О.Г., Поляков А.Н., Володько А.С., Горбунов А.В.**

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Мировой рынок промышленного газотермического напыления покрытий оценивался по состоянию на конец 2010-ых годов приблизительно в 10 млрд долларов и к 2027 году он, как ожидается, вырастет до 26 млрд; причем за последние годы в технологиях газотермического напыления покрытий группа плазменного напыления (в первую очередь это напыление при атмосферном давлении – APS, atmospheric plasma spraying) занимает в ряде крупных стран долю рынка до 30%. Одним из направлений совершенствования APS-технологий для современных функциональных керамических покрытий (применяемых в машиностроении, металлургии, энергетике, химической, авиационной и оборонной промышленности и других отраслях) является оптимизация условий тепломассообмена порошка с плазменной струей, в частности, за счет улучшения работы электродуговых плазмотронов (ЭДП) по их температурно-скоростным параметрам и по составу плазмообразующих газов. В данной группе технологий в последнее время появилась новая

подгруппа - с применением углеводородов в плазмотронах (условно - FA-APS, fuel assisted APS), в частности, с использованием синтез-газа на основе смесей  $H_2$  с  $CO$ , а также плазмы продуктов сгорания, как плазмообразующих сред. Данного типа плазменно-топливную разновидность напыления целесообразно, на наш взгляд, ориентировать на применение в первую очередь для получения таких функциональных покрытий, как: а) износостойкие покрытия деталей машиностроительной номенклатуры на основе оксидов, в первую очередь оксида алюминия, как наиболее востребуемые за последние годы по сочетанию достигнутого уровня технико-экономических показателей для предприятий реального сектора, в частности, энергетического и нефтедобывающего оборудования, в т.ч. в РБ и в ближнем зарубежье; б) антисептические и антибактериальные покрытия на основе сплавов меди для ряда изделий (фурнитуры, аксессуаров) в медицинских учреждениях.

Как цель данной работы нами выбрана модернизация/интенсификация процесса плазменного напыления металлических и других функциональных (износостойких и антимикробных) покрытий на изделия машиностроительного и медицинского назначения, за счет введения высококалорийных углеводородных добавок в аппарат напыления.

Для проведения экспериментального исследования нами, с учетом доступности использования на предприятиях РБ газовых топлив, был принят как базовый вариант ПТС с вводом технического пропан-бутана (см. схему на рис.1). Была проведена разработка и изготовление двух видов топливного интенсификатора варьируемой геометрии, состыковываемого с электродуговым плазмотроном ПП-25 мощностью до 40 кВт, а также дополнительной оснастки (кожуха) для аппарата напыления, способствующей повышению энергетического КПД установки и защите металлических порошков при напылении от окружающей атмосферы.

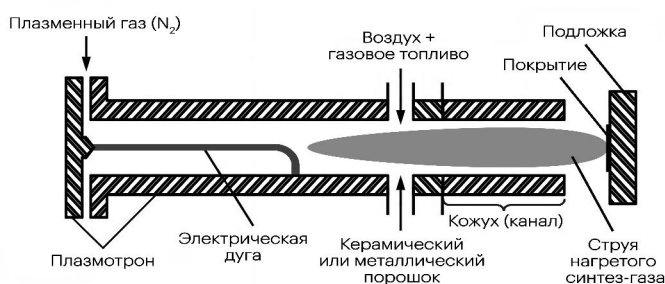


Рис. 1. Схема разрабатываемой плазменно-топливной системы (ПТС) с плазменной струей и вводом углеводородов и с подачей порошков для нанесения покрытия на металлические детали

Была проведена серия экспериментов с определением режимных и конструктивных параметров плазменно-топливной системы для напыления оксидных и металлических материалов на образцы, для определения оптимизированных режимов. На рис. 2 приведены фотографии работы аппарата напыления в режимах напыления данных материалов. Исследование позволило подобрать оптимальную конструкцию ПТС, в т.ч. угол ввода топливно-воздушной смеси в плазменную струю  $\sim 25$  градусов, что обеспечивает формирование на выходе потока газовой или газодисперсной смеси (в режимах

с вводом порошка) из кожуха приемлемую «фокусировку» и пониженную турбулентность потока, способствующую высокой скорости напыляемых частиц перед подложкой. Для образцов полученных покрытий толщиной от 80 до 450 мкм из трех вариантов порошковых материалов: промышленный  $Al_2O_3$  российского производства (по ТУ 6-09-426-75, фракция 40-60 мкм); промышленных бронзового порошка ПГ-19М-01 и порошка сплава на никелевой основе ПГСР4 по ГОСТ 21448-75 (для обеих фракция 40-100 мкм), было проведено тестирование некоторых механических и функциональных параметров покрытий на пластинчатых изделиях из Стали 30, толщина 5 мм, показавшее возможность применения покрытий для изделий машиностроительного и медицинского назначения. Для функционального применения покрытий, например, из медных сплавов на изделиях медицинского назначения по литературным данным достаточно толщины не более 100 мкм. Исследованиями зарубежных специалистов установлено, что подобные бронзовые покрытия обеспечивают долговечные поверхности с антибактериальными свойствами, соответствующие санитарно-гигиеническим требованиям.

Исследование показало, что напыление целесообразно вести на плазменной установке типа УПУ-3Д или аналогичных, с использованием вспомогательного оборудования (разработки НИПИ БНТУ), обеспечивающего возможность гибкого использования возможностей предлагаемого плазменно-топливного варианта напыления. Набор предпочтительных режимных параметров процесса приведен в Таблице.



(А)



(Б)

Рис. 2. Фотографии вариантов работы ПТС на основе плазмотрона с топливным интенсификатором в ходе исследования без присоединения вспомогательного кожуха – в режиме с вводом металлического (ПГ-19М-01) порошка (А) и с вводом порошка  $Al_2O_3$  (Б) при напылении на стальные подложки

Таблица. Оптимальные режимные параметры изученного процесса напыления

Наименование показателя режима напыления	Единица измерения	Величина показателя
1. Напряжение дуги плазмотрона	В	90...95
2. Ток дугового разряда в плазмотроне	А	300...420
3. Расход плазмообразующего газа (N <sub>2</sub> )	л/мин	50...65
4. Расход транспортирующего порошок газа (N <sub>2</sub> )	л/мин	7...12
5. Расход газа в топливный интенсификатор (пропан-бутана) -регулируется в зависимости от напыляемого порошка для получения нужной рабочей среды (окислительной или иной)	л/мин	2,5...8
6. Расход окислителя в топливный интенсификатор (сжатого воздуха низкого давления)	л/мин	60...80
7. Дистанция напыления от выхода из топливного интенсификатора до детали	мм	170...250

**Выводы.** Полученные экспериментальные данные показали, что исследованный вид плазменно-топливного процесса напыления может в оптимальных режимах обеспечивать повышенный уровень выходных параметров по сравнению с аналогичными технологиями, в т.ч. производительность до 7,0 кг/ч по Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- порошковому сырью и до 15,0 кг/ч по порошку алюминиевой бронзы при использовании умеренной мощности плазмотрона, работающего на азоте (плазмообразующем газе) – до 35-40 кВт и при ограниченном расходе вводимого углеводородного газа (в использованном нами варианте – технического пропан-бутана марки СПБТ) – 0,1-0,35 кг/ч. Полученные данные могут быть положены в основу новой технологии напыления, с использованием вспомогательного топлива, на базе аппарата нашей конструкции, - которая по результатам проведенного обзора является патентоспособной, в частности, применительно к получению металлических покрытий из порошковых материалов на основе медных и никелевых сплавов.

## **МИКРОТВЕРДОСТЬ В ЕДИНИЧНЫХ ВАЛИКАХ ИЗ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ ВОЛОКОННЫМ ЛАЗЕРОМ**

**Девойно О.Г., Шелег В.К., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Пилецкая Л.И.**  
Белорусский национальный технический университет Минск, Республика Беларусь

Покрyтия, 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 покрываниям, 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 распределение микротвердости в поперечном сечении единичных валиков из самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01. 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 боковой лазерной наплавки. Сканирование лазерного пятна осуществлялось перпендикулярно направлению наплавки. Распределение микротвердости по глубине валиков наплавки исследовалось с помощью микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 100 г по направлению из основы в валик для разных режимов лазерной наплавки.

Результаты исследований представлены на рис. 1. Для всех режимов лазерной наплавки наблюдается равномерное распределение микротвердости по высоте валика. Такое распределение микротвердости характерно для хорошего перемешивания материала валиков и равномерного прогрева по всему объему валиков. Можно отметить небольшое уменьшение равномерности распределения микротвердости при увеличении площади пятна сканирования, что может говорить о некотором ухудшении равномерности прогрева и перемешивания материала валиков. Плавное изменение микротвердости на границе основы и валиков свидетельствует о хорошем металлургическом соединении материалов валиков и основы.

При всех режимах наплавки имеет место большая величина зоны термического влияния, глубина которой увеличивается при увеличении площади пятна сканирования. Последнее обстоятельство связано, скорее всего, с увеличением скорости нагрева и охлаждения в этом случае.

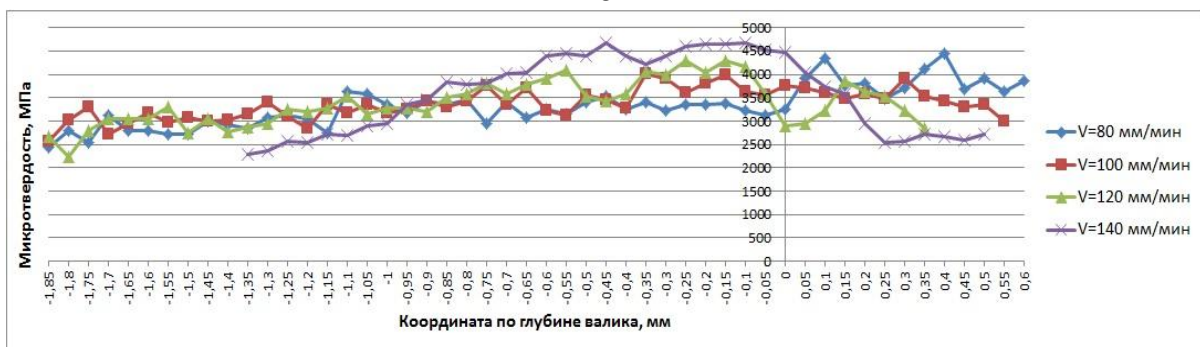




а



б



в

Рис. 1. Распределение микротвердости по глубине валиков, нанесенных при мощности излучения 1000 Вт: а – при площади пятна сканирования 4×0,1 мм; б – при площади пятна сканирования 4×0,3 мм; в – при площади пятна сканирования 4×0,5 мм

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.

## МКЭ-АНАЛИЗ УСИЛЕНИЯ МНОГОЦЕЛЕВОГО СТАНКА КЛИНОВИДНЫМИ СТРУКТУРАМИ ИЗ ПОЛИМЕРБЕТОНА

Довнар С.С.<sup>1</sup>, Яцкевич О.К.<sup>1</sup>, Резник С.В.<sup>2</sup>,  
Шведова Д.Н.<sup>1</sup>, Аглушевич И.Ю.<sup>1</sup>

1) Белорусский национальный технический университет, Минск

2) ОАО «СтанкоГомель», Гомель, Республика Беларусь

Исследовался горизонтальный 3-координатный многоцелевой станок для черновой и получистовой интенсивной (*heavy-duty*) обработки деталей корпусного типа. С помощью МКЭ моделировалась несущая система (НС) станка (рис.1), состоящая из пустотелых чугунных деталей. Предыдущие исследования указывают на необходимость усиления НС.

Станок включает в себя Т-образную станину *Bs*, стойку *St* прямоугольной формы, перемещающуюся по *X* и стол *T* габаритами 500×500 мм, движущийся по *Z*. В О-образной прорези стойки по *Y* перемещается бабка *Car* со шпиндельным узлом *Sp*. Здесь и далее маркеры *Sx*, *Sy*, *Sz* указывают на элементы приводов подачи по соответствующим осям. Маркер *Rr* отмечает танкетку на рельсовой направляющей.

Станок обладает неплохой статической жесткостью по всем осям (на торце шпинделя – 50, 86 и 196 Н/мкм по *X*, *Y*, *Z* соответственно). Однако, машина не свободна от динамических проблем. Это связано с самыми низкочастотными (главными) резонансами.

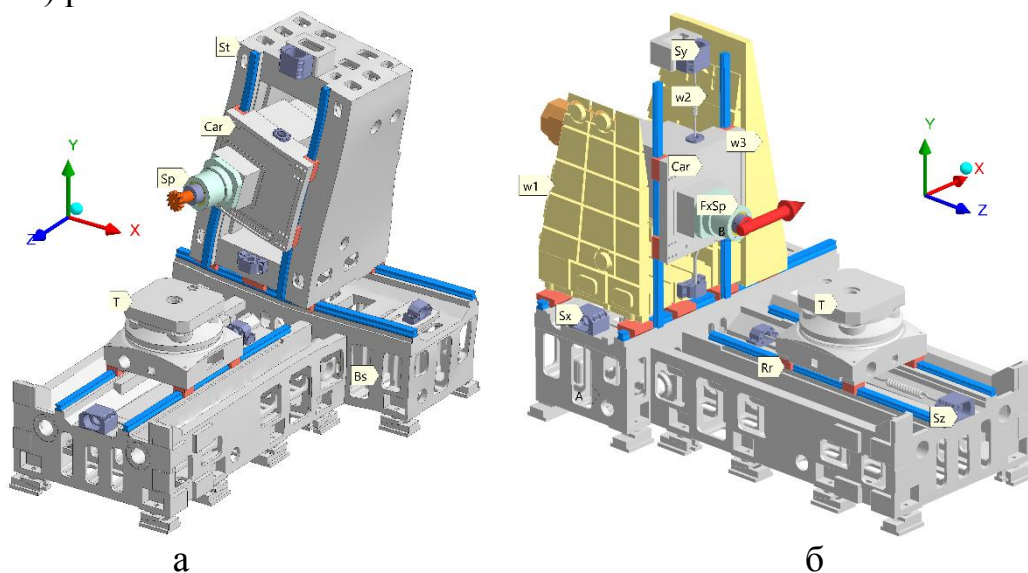


Рисунок 1 – Станок при резонансном возбуждении (мода *M1*) стойки *St* (а) и усиливающие клиновидные структуры *w1*, *w2*, *w3* (б; вариант *W123*)

Главная резонансная мода *M1* на частоте 34,1 Гц отображена на рис.1, а. Она заключается в изгибах и раскачивании пустотелой стойки (вариант *Holl*) вдоль *X*. Резонанс обусловлен прямоугольными очертаниями стойки и

ослаблением её О-образной прорезью. Следующие резонансы  $M2$  (изгиб в YZ) и  $M3$  (кручение стойки) лежат на частотах 51,7 и 86,9 Гц соответственно.

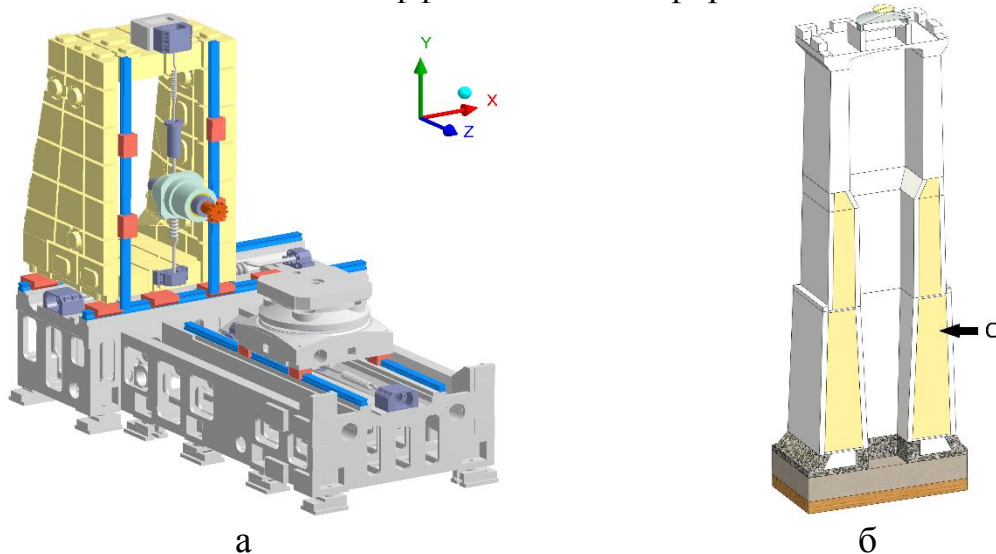
Задачей является повышение частоты резонанса  $M1$  и сдерживание раскачек шпинделя. В исследовании проводится МКЭ-анализ усиления стойки полимербетоном типа УНРС [1]. Простым решением является заполнение бетоном рабочих полостей во всей стойке (вариант *FullC*; рис.2, а). Однако, помещение внутрь стойки 829 кг бетона не дает заметного динамического эффекта. Повышение жесткости компенсируется утяжелением стойки.

Было предложено (рис.2) усилить стойку клиновидными полимербетонными структурами (КПС), утончающимися вверх. Прием позаимствован (рис.2, б; [2]) из конструкций исторических итальянских строений (башня Азинелли, XII-ый век; маркер С – известковый бетон *stuccato*), переживших сложную динамическую историю.

Полимербетонные клинья (рис.1, б; рис.2) можно отливать в стенках стойки (структуры  $w1$ ,  $w2$  на рис.2, в), а также формировать снаружи стойки (структура  $w3$  на рис.2, г - с дополнительной парой опорных танкеток). Клинья требуют ограниченного количества бетона и упрочняют нижнюю часть стойки. Введение клиньев несколько опускает центр тяжести стойки в сборе, что важно для динамики машины.

Работа внутренних клиньев  $w1$ ,  $w2$  по противодействию колебаниям стойки отражена на рис.3, а (вариант  $W12$ ). Вариант  $W3$  (рис.3, б) показывает совместную со стойкой деформацию внешнего клина  $w3$ . Картины эквивалентного напряжения  $\sigma_e$  на рис.3 показывают, что все бетонные клинья нагружены умеренно по отношению к чугунным стенкам станины и стойки.

Для вариантов *Holl*, *FullC* и «клиновидных» вариантов  $W12$ ,  $W3$ ,  $W123$  были проведены статический, модальный и гармонический анализы. В ходе гармонического анализа станок возбуждался осциллирующей силой  $FxSp$  (рис.1, б), имеющей амплитуды 1 кН и приложенной к торцу шпинделя вдоль X. Испытание отображало прерывистое резание. Модели был присвоен коэффициент демпфирования  $\xi_c = 1\%$ . Для чугуна и полимербетона были назначены повышенные коэффициенты демпфирования 2% и 3%.



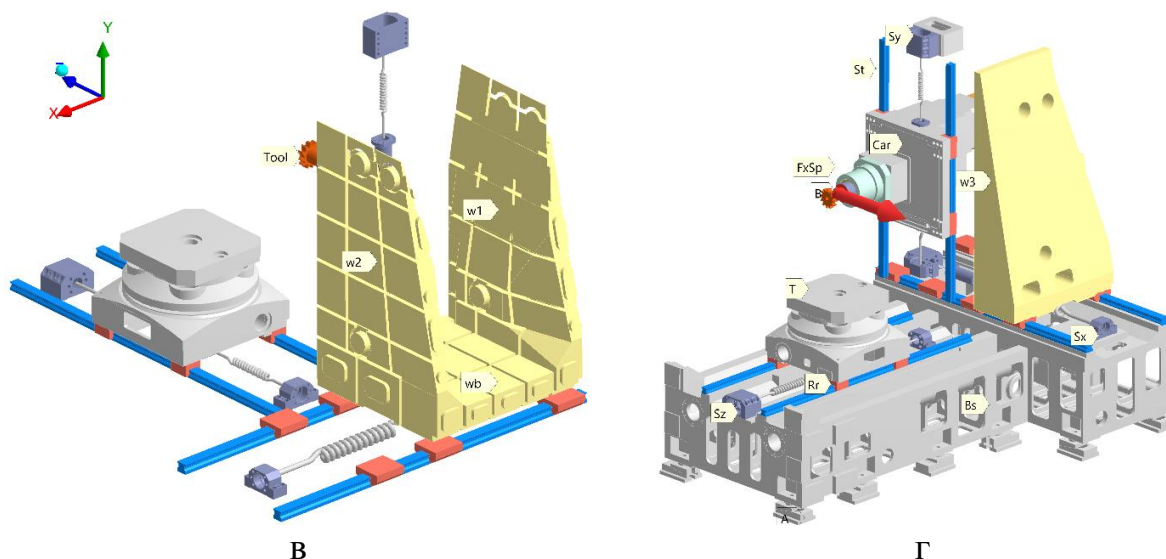


Рисунок 2 – Усиливающие бетонные структуры: а – прямоугольное заполнение стойки (829 кг; вариант *FullC*); б – историческое решение (башня Азинелли, Болонья) [2]; в – внутренние клинья  $w1$ ,  $w2$  (278 кг) и днище  $wb$  (235 кг) - вариант *W12*; г - наружный клин  $w3$  - вариант *W3* (550 кг)

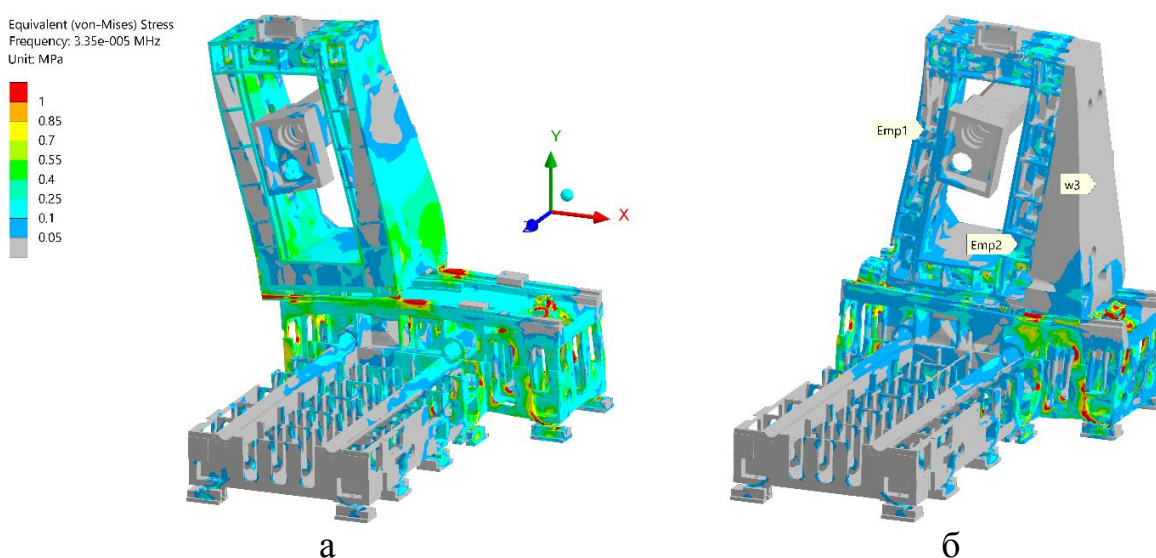


Рисунок 3 – Картины эквивалентного напряжения  $\sigma_e$  на частоте возбуждения 33,5 Гц (МПа;  $\times 15000$ ) при усилении парой клиньев  $w1$ ,  $w2$  (а; вариант *W12*) и наружным клином  $w3$  (б; вариант *W3*; полости стойки пусты – *Emp1*, *Emp2*)

По результатам гармонического анализа было построено семейство АЧХ (рис.4). Выходом являлось перемещение торца шпинделя по X. Это характеризует динамическую податливость станка. Пики всех кривых относятся к возбуждению резонанса *M1*. Кривая *FullC* мало отличается от базовой линии *Holl*. Это показывает малую эффективность полного заполнения стойки полимербетоном.

ПКС по варианту *W12* обладают умеренной динамической эффективностью. Соответствующая кривая смещена вправо относительно *Holl*. Внешний клин (*W3*) существенно лучше гасит резонансные раскачки, чем

только внутренние клиновые структуры. ПКС в варианте *W123* ожидаемо показывают самую высокую динамическую эффективность.

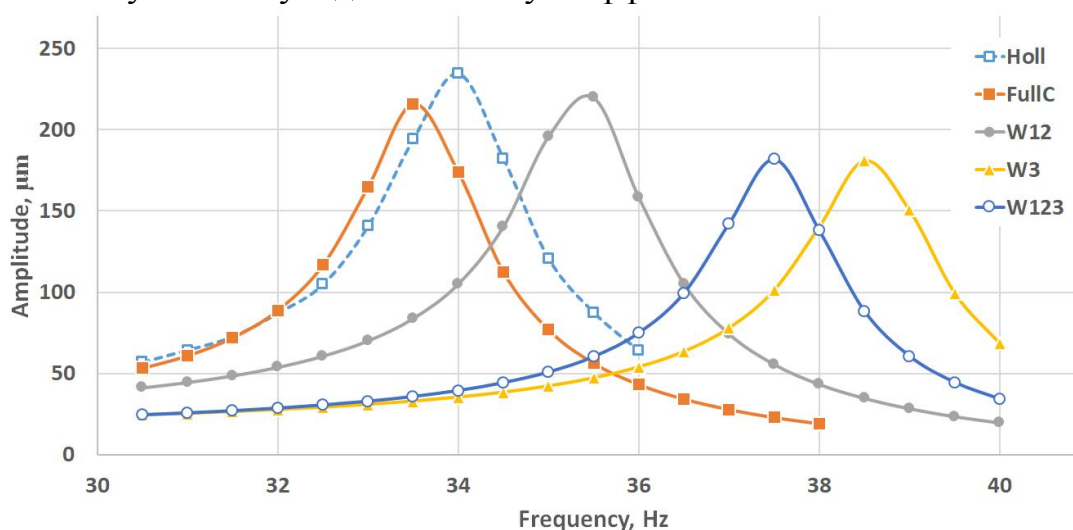


Рисунок 4 – АЧХ перемещения торца шпинделя по X в районе резонанса *M1* для различных вариантов полимербетонного усиления стойки станка

Полимербетонные клинья, суживающиеся снизу вверх, и прилегающие к стенкам стойки, рекомендуются для усиления НС станка. Они до полутора раз, уменьшают амплитуду продольной раскачки подвижной стойки. Одновременно возрастают частоты нижних резонансных мод станка. Дополнительным резервом повышения динамической жесткости станка является усиление станины под рельсами X.

Рекомендуется сочетать в стойке станка внутренние и внешние клиновые полимербетонные структуры.

1. Jiang Du, Weina Meng, Kamal H.Khayat, Yi Bao, Pengwei Guo, Zhenghua Lyu, Adi Abu-obeidah, Hani Nassif, Hao Wang. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). – Composites, Part B: Engineering, 2021, Volume 224, 109220
2. Довнар С.С., Лапука А.Д., Шведова Д.Н., Роденя А.В. МКЭ-анализ несущей системы исторической башни Азинелли как рационального образца для проектирования композитных колонн // Машиностроение: Республиканский межведомственный сб. научных трудов, Вып. 34. – Мн: БНТУ. 2022. – С.

## РАЗРАБОТКА КЛИНОВОГО ИНСТРУМЕНТА С ПЕРЕМЕННЫМ УГЛОМ НАКЛОННОЙ ДЕФОРМИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОБРАТНОЙ ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКЕ

Дубенец С.С.

Физико-технический институт НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь

Одним из этапов разработки клинового инструмента является выбор оптимальных углов клиновых поверхностей  $\alpha$  и  $\beta$  (рисунок 1). Применение угла  $\beta$  менее  $5^\circ$  приводит к значительному увеличению длины клинового инструмента [1], что влечёт за собой перерасход инструментальной стали на изготовление. Уменьшить длину деформирующей поверхности можно за счёт плавного изменения угла  $\alpha$  и перехода его на калибрующий участок с наклонной поверхностью с меньшим углом, как показано на сечении Б-Б рисунка 2.

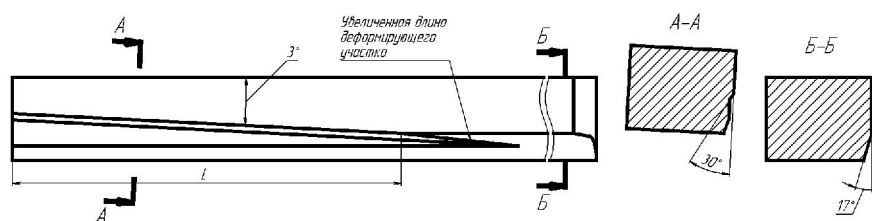


Рисунок 1 – Клиновая поверхность с постоянным углом  $\alpha = 30^\circ$  и  $\beta = 3^\circ$

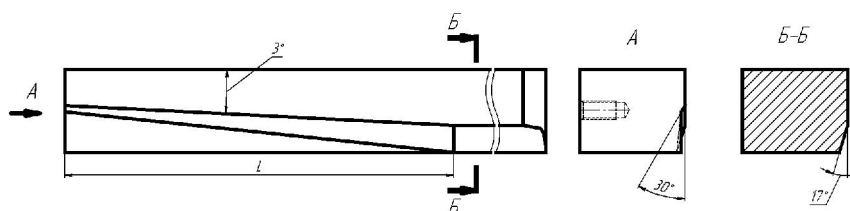


Рисунок 2 – Клиновая поверхность с плавно изменяющимся углом  $\alpha$  от  $30^\circ$  до угла  $17^\circ$  калибрующего участка

Применение данного способа позволяет предусмотреть место для набора объёма материала при обратной поперечно-клиновой прокатке со степенями обжатия менее 1, а также плавно увеличить площадь контакта инструмента с заготовкой. Увеличение пятна контакта влечёт за собой, повышение трения, что положительно влияет на формоизменение при способе обратной прокатке.

1. Клушин, В.А. Технология и оборудование поперечно-клиновой прокатки: монография / В.А. Клушин, А.О. Рудович. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2010. – 300 с.

## ПРИМЕНЕНИЕ ВОКСЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ПРИ ПОМОЩИ ЦИФРОВОЙ ТЕНИ СИСТЕМЫ ЧПУ

Евстафиева С.В., Грубляк В.Я.

Московский государственный технологический университет «Станкин»  
Москва, Российская Федерация

На этапе внедрения программы для станка с ЧПУ для нового изделия существует высокая вероятность испортить заготовку из-за ошибки в программе. Для отладки управляющих программ вместо реального оборудования имеет смысл использовать цифровой двойник или цифровую тень системы, которые, при помощи полигонального или твердотельного моделирования могут обрабатывать перемещения исполнительных органов системы ЧПУ [1]. Для проверки работы управляющей программы необходима также визуализация непосредственной обработки.

Расчет геометрии заготовки является довольно сложным процессом. Полигональные модели для этого не годятся, так как формулы для расчета и вычета объема инструмента из тела заготовки довольно сложны для реализации и сильно нагружают центральный процессор компьютера, что делает отображение геометрии в реальном времени невозможным. Для изменения геометрии в реальном времени хорошо подходят воксельные модели [2]. В данной работе решается задача сопряжения двух моделей: полигональной для визуализации станка и воксельной для визуализации процесса обработки.

В решении используется воксельная меш-модель с разряженным октодеревом [3], которое позволяет уменьшить количество объектов на сцене визуализации, что приводит к сокращению количества вычислений процессора, связанных с обработкой коллизии тела заготовки и инструмента. В принципе действия воксельной меш-модели с разряженным октодеревом заключается два понятия: воксельный меш и разряженное октодерево. Меш является примитивом, минимально-возможной частицей объекта, из которых состоит тело заготовки. Разряженное октодерево описывает структуру объекта и оптимизирует количество мешей на сцене и вычислений с ними связанных.

Использование октодерева позволяет не отображать все частицы объекта сразу, а только лишь увеличенные копии частиц, занимающие весь объем дочерних элементов (ветвей), которые еще не созданы и не чувствуют в сцене. Такой заготовке можно задать примитивную форму, например цилиндр, параллелепипед, или более сложную, использующую частицы как конструктор и присвоить параметр количества поколений в дереве, который подбирается исходя из требований к качеству отображаемой модели обрабатываемой детали и аппаратных мощностях вычислительного оборудования.

Процесс обработки модели заготовки заключается в следующем: при контакте инструмента с родительским элементом октодерева меш делится на

восемь частей, у которых параметр поколения будет меньше на единицу. При этом родительский элемент удаляется. После этого этапа при контакте с потомком первого уровня тот также делиться на восемь частей с меньшим параметром поколения, а затем удаляется. Так продолжается до того момента как у делящихся частиц параметр поколения не опустится до нулевого значения.

Концепция воксельной меш-модели с разреженным октодеревом позволяет реализовать модуль обработки заготовки в реальном времени на модели вертикально-фрезерного станка, под управлением системы ЧПУ (рис. 1). При помощи разреженного октодерева удаётся достичь высокого качества детализации, по сравнению с генерацией полного кубического массива частиц, за счет уменьшения объектов на сцене (рис.2).

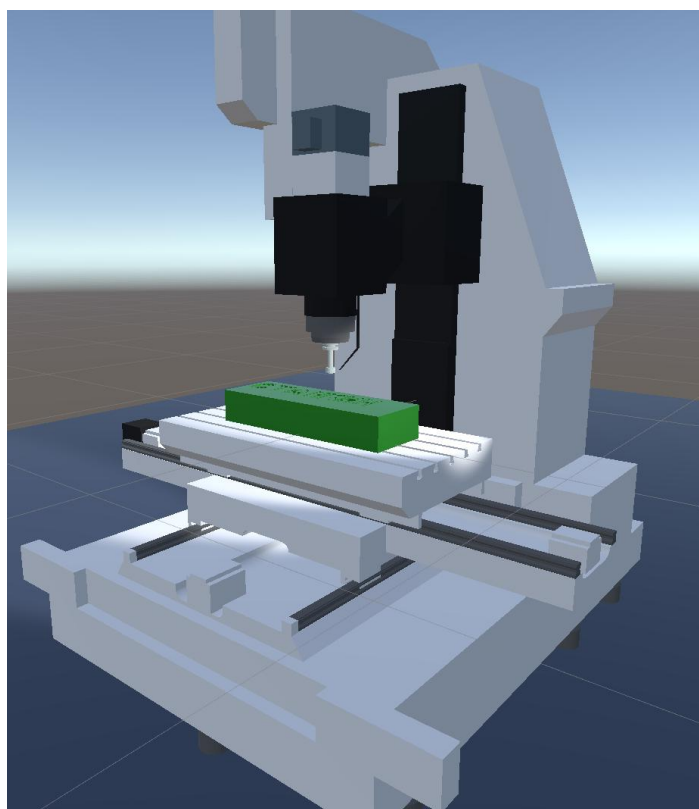


Рис. 1 – Визуализация работы вертикально-фрезерного станка

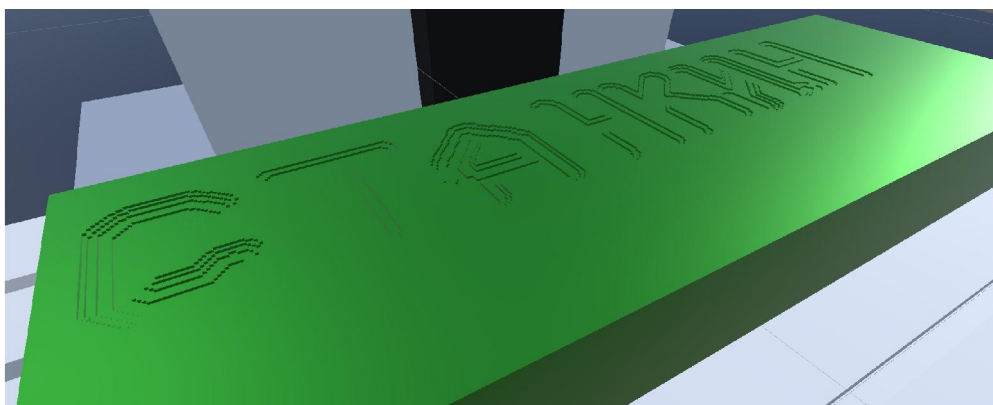


Рис. 2 – Визуализация обработки заготовки



1. Пушков Р.Л., Евстафиева С.В., Грубляк В.Я. Методика разработки имитационной модели станка для взаимодействия с системой ЧПУ // Вестник МГТУ "Станкин", №4(63), 2022.с.50-57.
2. Евстафиева С.В., Обухов А.И., Рыбников С.В. Архитектура и реализация системы твёрдотельного моделирования обработки изделий в реальном времени // Автоматизация в промышленности, №5. 2019. с.9-13.
3. S.Laine, T.Karras. Efficient Sparse Voxel Octrees – Analysis, Extensions, and Implementation [Электронный ресурс] // [https://research.nvidia.com/sites/default/files/pubs/2010-02\\_Efficient-Sparse-Voxel/laine2010tr1\\_paper.pdf](https://research.nvidia.com/sites/default/files/pubs/2010-02_Efficient-Sparse-Voxel/laine2010tr1_paper.pdf) (дата обращения: 06.03.2023г.)

**УДК 621.715.2**

## **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО СИМУЛЯТОРА ШЛИФОВАЛЬНО-ЗАТОЧНОГО СТАНКА С ЧПУ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА КОНЦЕВОГО ТИПА**

**Исаев А.В., Белоцкий А.С.**

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Российская Федерация

Шлифовально-заточные станки с числовым программным управлением (ШЗС с ЧПУ) — специализированный вид оборудования, предназначенный для изготовления и переточки различных режущих инструментов. Известна проблема недостаточной функциональности и низкой производительности программного обеспечения (станочных САМ-систем), предустановленного на ШЗС с ЧПУ. Более современные версии такого ПО часто не поддерживают работу со старыми моделями станка. Кроме технологических задач, САМ-системы могут использоваться в обучении студентов профильных направлений и в повышении квалификации инженерного состава машиностроительных предприятий. Однако, комплектное ПО, поставляемое вместе с ШЗС, может иметь ограничения, связанные с типом лицензии. Эти соображения показывают актуальность создания специализированной гибкой конфигурируемой открытой системы подготовки управляющих программ (УП) для ШЗС с ЧПУ [1]. Важность задачи обусловлена фактическим отсутствием в настоящее время производства в России данного класса оборудования и ПО к нему.

Для решения данной проблемы авторы разработали программный симулятор 5-координатного ШЗС с ЧПУ, который позволяет в автоматическом режиме генерировать УП для изготовления различных типов режущих инструментов или их отдельных поверхностей и производить их визуальную отладку при помощи встроенного симулятора (рис. 1) [2].

Геометрия инструмента и заготовки импортируется в программу из 3D-модели в формате .obj, что позволяет симулировать обработку инструментом и заготовкой любой формы. Затем приложение генерирует управляющую

программу обработки и на ее основе выполняет симуляцию работы станка по УП. При необходимости симулятор выполнять отладку любой УП, например, написанной вручную на стандартном языке G-code.

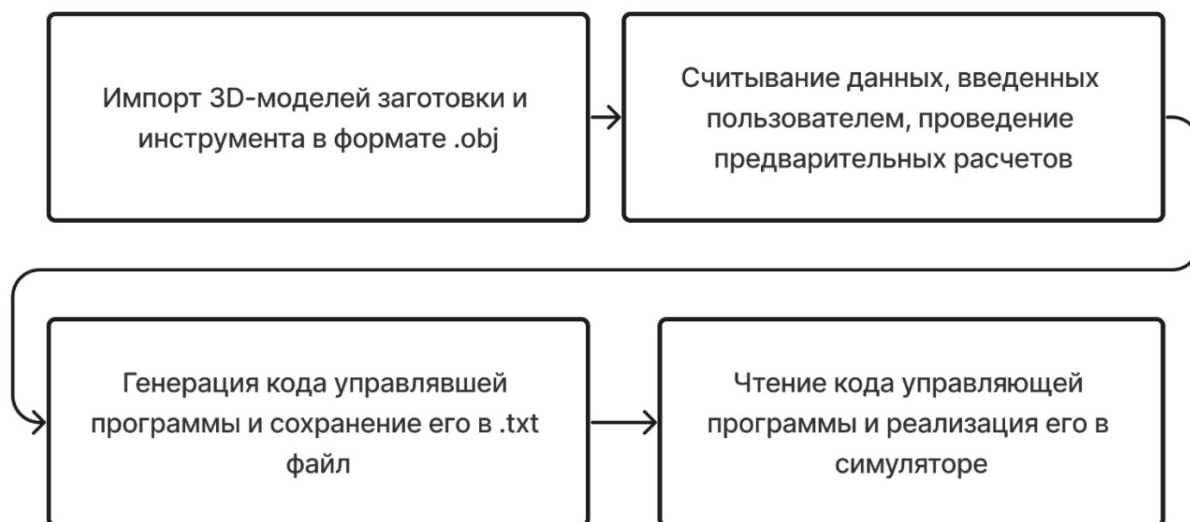


Рис. 1. Алгоритм работы приложения

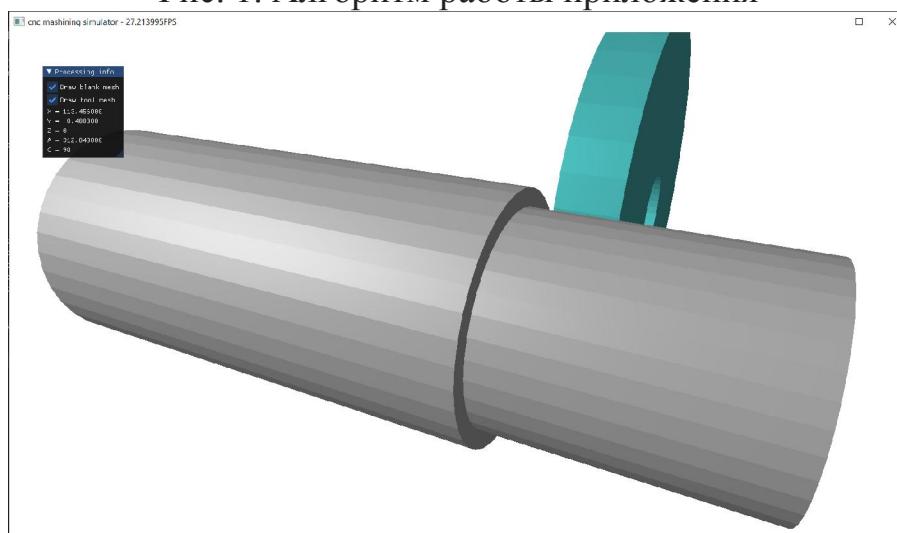


Рис. 2. Рабочее окно симулятора

В приложении предусмотрена возможность быстрой перенастройки симулятора под любой пятикоординатный шлифовально-заточный станок.

1. Григорьев С. Н., Гречишников В. А., Волосова М. А., Исаев А. В. и др. Разработка цельных концевых фрез из режущей керамики для обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов // Вестник МГТУ «СТАНКИН» 4(47), 2018. С. 4–7.
2. Гречишников В. А., Пивкин П. М., Исаев А. В., Белоцкий А. С. и др. Расширение технологических возможностей шлифовально-заточных станков с ЧПУ при изготовлении и заточке режущего инструмента методами АРІ САПР // СТИН. 2022. № 12(2). С. 2–5.

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СЪЕМ МЕТАЛЛА

Королёв А.Ю., Нисс В.С., Паршутто А.Э., Сорока Е.В.

Белорусский национальный технический университет,  
г. 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 (ИЭПО), совмещающий преимущества как электрохимического, так и электролитно-плазменного процесса [1]. В работе исследовалось влияние соотношения амплитуд и длительностей электрохимической (ЭХС) и электролитно-плазменной стадий на производительность ИЭПО.

Увеличение напряжения при длительности импульса электрохимической стадии 0,05 мс приводит к снижению съема с 4% при 0 В до 1,8% при 80 В. При длительности импульса электрохимической стадии 0,25 мс съем уменьшается с 5% при 0–60 В до 1,8% при 80 В. При длительности импульса ЭХС 0,5 мс наблюдается увеличение съема с 5% при 0 В до 6,3% при 60 В. Увеличение напряжения ЭХС до 100 В приводит к снижению съема до 3%. Снижение съема при напряжении электрохимической стадии более 60 В для всех длительностей импульса ЭХС объясняется, тем, что при таком его значении на ток начинает существенно влиять интенсивное образование пара и газа возле поверхности образца. При таких условиях увеличивается сопротивление приэлектродной зоны и, соответственно, снижается ток.

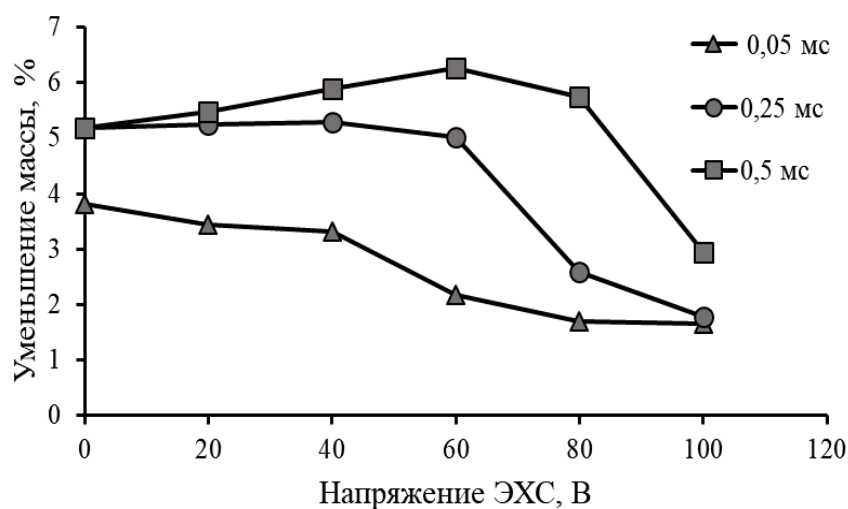


Рис. 1. Влияние амплитуды электрохимической стадии процесса ИЭПО на изменение массы образца при различных значениях длительности импульса

Особенности влияния амплитуды импульса напряжения ЭХС процесса ИЭПО на изменение массы образца можно объяснить тем, что при длительности импульса 0,05 мс парогазовая оболочка (ПГО) не исчезает полностью, что приводит к снижению силы тока, а, следовательно, и съема металла. При длительности 0,25 мс, а, тем более, при 0,5 мс схлопывание ПГО более вероятно, ток электрохимической стадии выше и, соответственно, больше съем. Ток электролитно-плазменной стадии достигает максимального значения 4,5 А при длительности импульса 0,5 мс и напряжении ЭХС 0 В, а при длительности импульса 0,05 мс и напряжении 0 В ток равен 1,7 А. Снижение тока при малой длительности импульса также объясняется влиянием ПГО.

Из зависимостей на рис. 2 видно, что при значении коэффициента заполнения (КЗ) 2,5% (длительность ЭХС – 0,05 мс) уменьшение массы минимально и составляет 2,8–3,0% для всех значений напряжения (0–40 В). При увеличении КЗ до 10 % уменьшение массы достигает 5,0–5,5% также для всех значений напряжения (0–40 В). При дальнейшем увеличении КЗ (увеличении длительности ЭХС) съем увеличивается до 8,5% при напряжении 40 В и КЗ 95%. Соответственно начало роста съема наблюдается при КЗ более 20% (длительность – более 0,4 мс). Эти результаты показывают, что на рост съема в значительной степени влияет значение напряжения ЭХС. Этот факт подтверждается зависимостями на рис. 3, демонстрирующими влияние коэффициента заполнения импульса стадий ИЭПО и амплитуды импульса напряжения ЭХС на изменение тока электрохимической стадии. При более длительном импульсе электрохимической стадии и большем напряжении ток существенно больше и при КЗ 95% и напряжении 40 В он достигает 5,8 А по сравнению с 0,0–0,2 А при КЗ 2,5% и напряжении 0 В. Для сравнительной оценки дополнительно выполнялась традиционная ЭПО на постоянном токе при напряжении 300 В. Съем составил 1,77%, что в 1,4–4,7 раза меньше, чем при исследованных режимах ИЭПО.

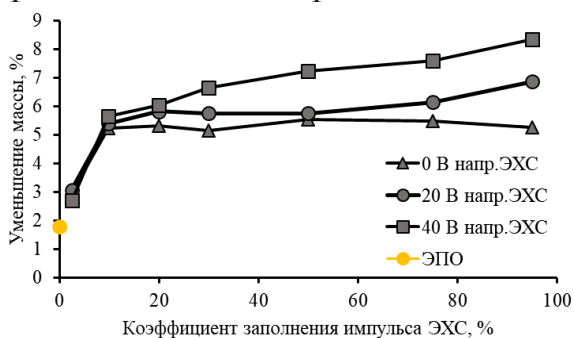


Рис. 2. Влияние коэффициента заполнения импульса стадий и амплитуды импульса напряжения ЭХС на изменение массы образца

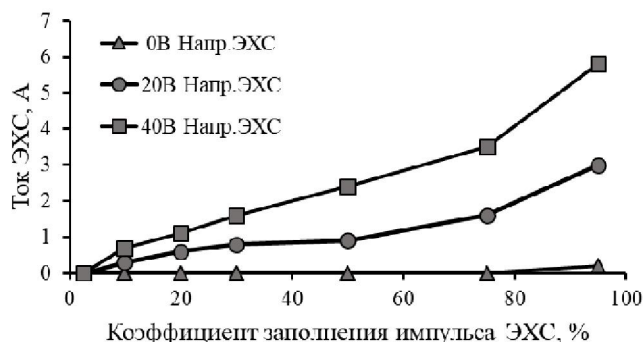


Рис. 3. Влияние коэффициента заполнения импульса стадий и амплитуды импульса напряжения ЭХС на изменение ее тока

1. Электролитно-плазменная обработка в управляемых импульсных режимах [Электронный ресурс] / А. Ю. Королёв [и др.] // Наука и техника. – 2021. – Т. 20, № 4. – С. 279–286.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА ПРИ МОДИФИЦИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

**Королёв А.Ю., Сенченко Г.М., Нисс В.С., Алексеев Ю.Г., Иванов А.И.**  
Белорусский национальный технический университет,  
г. 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 [1]. В работе исследовалось влияние тепловых и электрических условий (температура электролита, напряжение, плотность тока, удельная мощность) в процессе модифицирования поверхности титана с применением электролитно-плазменного нагрева на скорость нагрева, максимальную температуру нагрева и долю тепла, затрачиваемую непосредственно на нагрев.

Для исследований использовались образцы из титанового сплава ВТ6 диаметром 8 мм и длиной 30 мм. В качестве электролита использовался 10%-й водный раствор хлорида аммония. На рис. 1 представлены вольтамперные характеристики электролитно-плазменного нагрева при различных значениях температуры электролита. Для расчёта скорости и удельной мощности нагрева использовались данные, полученные при анализе начальных временных разверток тока. На развертках выделяются следующие стадии процесса нагрева (рис. 2).

1. Стадия погружения образца в электролит, во время которой происходит рост тока с образованием парогазовой оболочки вокруг образца. Длительность этой стадии, определяется скоростью погружения образца в электролит.

2. Стадия нагрева, во время которой в результате роста температуры образца увеличивается толщина парогазовой оболочки с постепенным снижением силы тока до постоянного значения. Длительность этой стадии соответствует времени нагрева образца.

3. Стадия поддержания температуры образца, во время которой значение силы тока остается постоянным.

Удельная мощность электролитно-плазменного нагрева определялась по стадии поддержания температуры образца – умножением усреднённого значения стабилизированного тока на соответствующее рабочее напряжение.

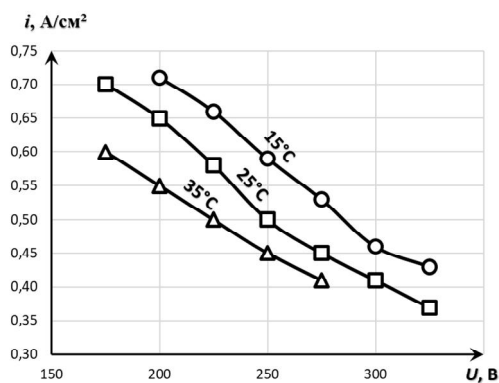


Рис. 1. Вольтамперные характеристики процесса анодного нагрева при различных значениях температуры электролита

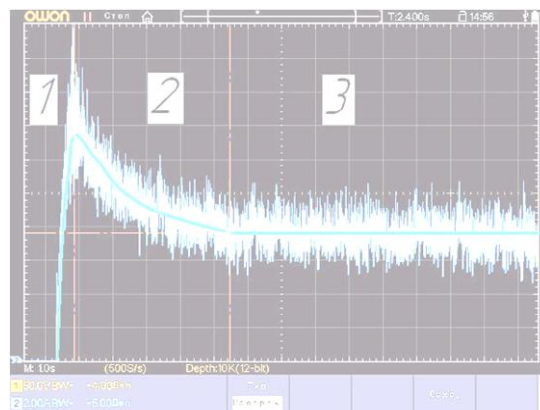


Рис. 2. Осциллограмма переходных процессов электролитно-плазменного нагрева при напряжении 175В

Зависимость распределения максимальной температуры нагрева от рабочего напряжения имеет параболический характер. В диапазоне 175–250 В наблюдается рост максимальной температуры нагрева, а далее происходит ее снижение. Во всём исследуемом диапазоне значений напряжения 175–275 В происходит плавный рост удельной мощности нагрева. В диапазоне от 175 до 250 В происходит увеличение скорости нагрева. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к снижению скорости нагрева.

На рис. 3 представлена зависимость изменения доли тепла от рабочего напряжения. Максимальная доля тепла, поступающего в анод ( $\eta_{\text{ан}} = 24,6\%$ ), обеспечивается при напряжении 250 В. С дальнейшим увеличением рабочего напряжения величина  $\eta_{\text{ан}}$  снижается.

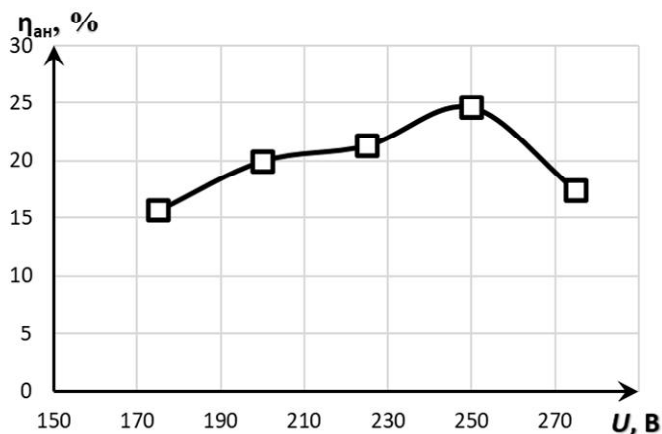


Рис. 3. Зависимость изменения доли тепла, затрачиваемого на нагрев анода, от напряжения

1. Особенности электролитно-плазменного нагрева при электрохимико-термической обработке стали / Ю.Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. – 2013. – №6. – С. 20-24.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ПОМОЩИ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

**Кротова Н.А., Евстафиева С.В.**

Московский государственный технологический университет «Станкин»  
Москва, Российская Федерация

При обработке нескольких заготовок на станке с запуском нескольких управляющих программ (УП), не учитывающих положение других заготовок, может возникать ситуация, когда при обработке одной заготовки траектория рабочего инструмента будет проходить через соседнюю заготовку. В таком случае возникает коллизия, которая может привести к браку детали или даже поломке дорогостоящего оборудования (рис.1).

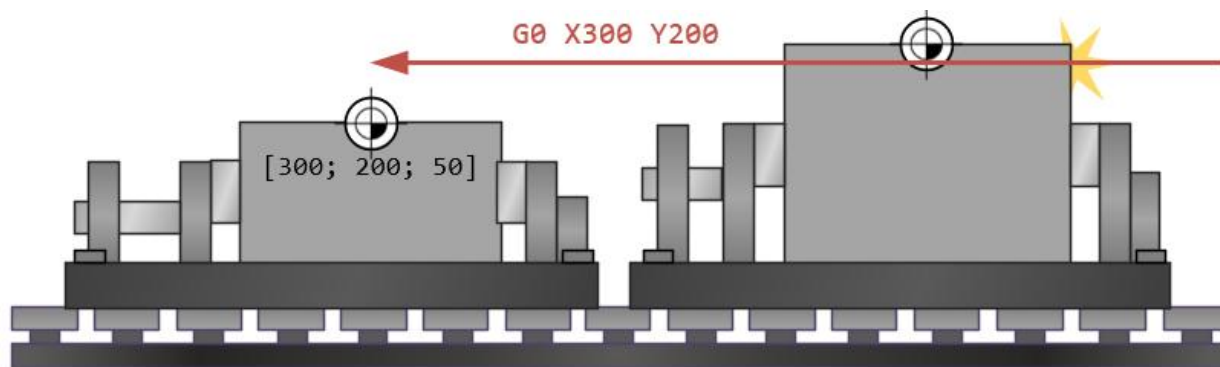


Рис. 1. Коллизия при обработке нескольких заготовок

Целью проекта<sup>1</sup> является разработка методов планирования траектории перемещения рабочего инструмента для привязки базисных систем координат на основе систем технического зрения и память-центрической архитектуры.

Для определения положения заготовки на столе станка планируется использовать систему технического зрения (СТЗ), описанную в работах [1, 2] с изменениями в архитектуре и упрощенным списком требований к аппаратной части СТЗ. СТЗ подключается к системе ЧПУ по схеме, приведенной на рис. 2.

Изображения рабочей области стола станка с установленными заготовками, полученные с камер, анализируются программным модулем. Результат анализа — размеры и координаты заготовок — позволяет судить о том, какая область допустима для перемещений инструмента при обработке заготовок (рис. 3).

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования и Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания (проект FSFS-2023-0004) с использованием оборудования центра коллективного пользования «Государственный инжиниринговый центр» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-15-2021-695 от 26.07.2021, уникальный идентификатор проекта RF----2296.61321X0013).

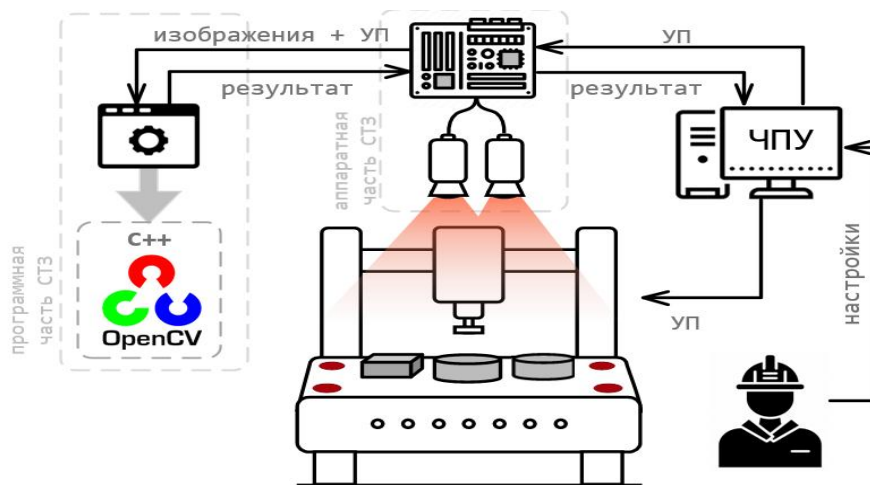


Рис. 2. Архитектура предлагаемого решения

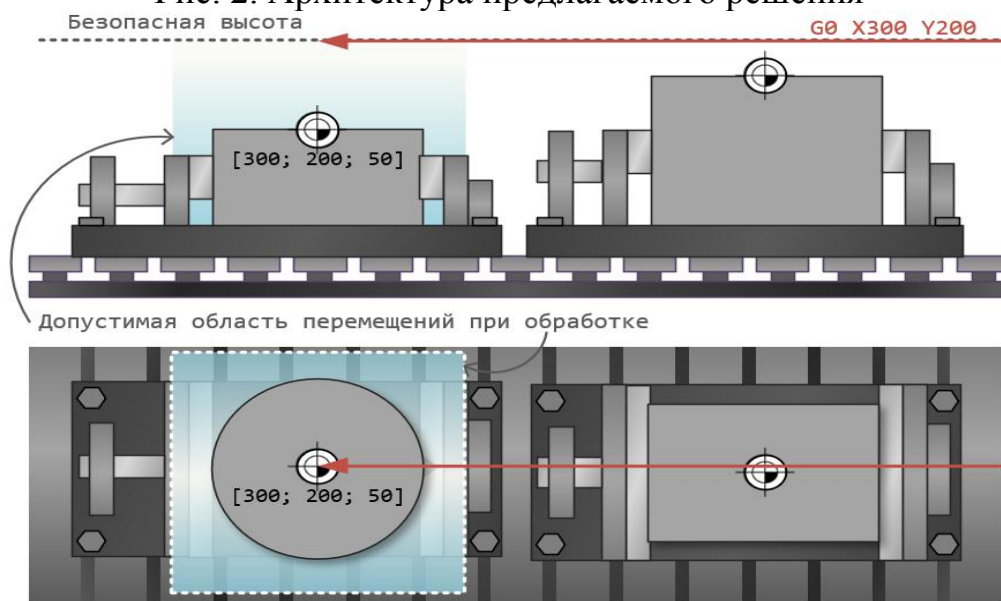


Рис. 3. Результат определения допустимой области перемещений

Управляющие программы, которые будут запущены для проведения обработки заготовок, анализируются на предмет превышения допустимой области перемещений, а также безопасной высоты при перемещении для смены инструмента, величина которой может передаваться как параметр управляющей программы в виде значения глобальной переменной СЧПУ. Результат обработки набора УП — заключение о том, возможно ли запустить его без возникновения коллизий.

1. Кротова Н.А., Пушков Р.Л. Разработка способа автоматизации привязки заготовки к системе координат станка с применением технического зрения // Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2021): Сборник трудов конференции (Москва, 30 ноября - 02 декабря 2021). М: Изд-во ИМАШ РАН, 2021. С. 402-408.
2. Кротова Н.А., Пушков Р.Л. Определение геометрических параметров и ориентации заготовки на станке с применением алгоритмов технического зрения // Вестник МГТУ «Станкин», №2, 2021.с.8-12.



## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ПУТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА**

**Крюков С.А., Шумячер В.М.**

Волгоградский государственный технический университет,  
Волгоград, Российская Федерация

Важной частью повышение эффективности шлифования является совершенствование абразивного инструмента (АИ). Это возможно достичь путем управления структурно-механическими характеристиками АИ. В основу совершенствования инструмента входит изучение адаптивных свойств инструмента при воздействии внешней среды, а также эффективности нововведений и их влияния на функциональные свойства инструмента в целом.

Основой управленческих решений явились теоретические положения работ по шлифованию и диспергированию материалов, физико-химической механике, молекулярной физике поверхностных сил и взаимодействий, физико-химическим основам смачивания, пропитывания и импрегнирования. Это позволило однозначно выявить причины изменчивости свойств и показателей инструмента установить основные факторы, влияющие на эти изменения.

Анализ и систематизация внешних воздействий, их комбинаций и сочетаний позволили разработать укрупненную классификацию способов воздействий для изменения функциональных свойств инструмента. Основными блоками этой классификации являются механические, физические, химические и комбинированные способы воздействия. Наибольший интерес представляет блок комбинированных способов и их сочетаний. Это объясняется тем, что при сочетании двух или трех физических, механических или химических воздействий можно получить инновационно-технологические эффекты, обеспечивающие как создание новых качеств серийного абразивного инструмента, так и значительное повышение производительности и качества шлифованных изделий.

При поиске и выборе рациональных сочетаний способов, необходимо, в первую очередь, учитывать физико-химические и структурно-механические свойства абразивного инструмента и обрабатываемой поверхности изделия. Перечень совмещаемых воздействий, их режимы, последовательность действия следует подбирать таким образом, чтобы они взаимно активизировали друг друга. Критериями правильности выбранного сочетания способов воздействий на абразивный инструмент должны служить достигаемые показатели качества и производительности процесса шлифования.

Первый способ посвящён импрегнированию АИ. Последовательность действия совмещенных воздействий заключается в следующем. Первоначально термопрокалку инструмента проводят при температуре 450...500°С с

выдержкой 20...30 мин в нагревательном устройстве, потом производят его закалку охлаждением на воздухе, а затем подвергают пропитыванию гидрофобным импрегнатором (расплавом серы) при равной температуре инструмента и импрегнатора [1].

Использование импрегнатора, обладающего гидрофобными свойствами, при пропитывании закаленного абразивного инструмента позволяет защитить поверхности зерна и порового пространства от воздействия окружающей среды, особенно от влаги, и сохранить на длительное время приобретенные инструментом новые качества. Одновременно с этим полно и равномерно закаленный и пропитанный инструмент имеет постоянные показатели процесса шлифования, что сказывается на улучшении качества поверхности шлифованного изделия.

Второй способ предусматривает при изготовлении инструмента использование абразивного зерна с оптимальным фракционным составом, включающим зерна как основного размера, так и мелкой фракции в определенном объемном соотношении с основной фракцией. Эффект применения такого наполнителя заключается в том, что зерна более мелкой фракции, находясь внутри черепка инструмента, выполняют роль упорядочивающих и армирующих частиц, а при выходе на поверхность абразивного инструмента выкрашиваются с образованием поверхностной поры. Такой абразивный инструмент обладает более высокой прочностью и большей однородностью структуры по сравнению с инструментом, изготовленным по существующей технологии.

Третий способ основан на запатентованном нами техническом решении [2]. Сущность решения заключается в том, что при изготовлении высокопористого инструмента, вместо выгорающих наполнителей используются наполнители, выполненные из абразивного и огнеупорного материала, который в свою очередь адгезионно-инертен керамической связке.

Предлагаемый инструмент позволяет создавать в процессе шлифования рабочую поверхность, подобную рабочей поверхности высокопористого инструмента при сохранении прочности черепка исходного инструмента заданной структуры.

Испытания опытных образцов предлагаемых инструментов показывают, что режущая способность шлифовальных кругов увеличивается в 1,5-1,8 раза, скорость изнашивания снижается в 1,2-1,5 раза, стойкость кругов повышается в 1,5-2,0 раза по сравнению со стандартными кругами таких же структур и марок.

1. Патент на изобретение № 2164857 В24 ДЗ/34, 3/14, 2001 г. Способ повышения эксплуатационных свойств абразивного инструмента / В.М. Шумячер, В.И. Анохин, С.А. Крюков.
2. Патент на изобретение № 2215643 В24 ДЗ/18, 2003 г. Абразивный инструмент / В.М. Шумячер, В.А. Назаренко, С.А. Крюков, И.В. Дуличенко.

## ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИТОВ, СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ ДПГИ

Леванцевич М.А.<sup>1</sup>, Максимченко Н.Н.<sup>1</sup>, Пилипчук Е.В.<sup>2</sup>

1) Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

2) Белорусский национальный технический университет, г. Минск

**Введение.** Композиционные материалы и покрытия достаточно широко используют в современном машиностроении. Главным преимуществом композиционных материалов является возможность введения твердосмазочных компонентов (графит, сульфиды, фториды, др.), значительно увеличивающих несущую способность материала (покрытия) и снижающих коэффициент трения скольжения [1]. Использование таких материалов в качестве доноров при формировании функциональных покрытий является весьма перспективным направлением. Технология деформационного плакирования гибким инструментом (ДПГИ), является перспективным и экономичным способом улучшения эксплуатационных характеристик ответственных деталей машин, однако опыт промышленного применения показывает, что не всегда сформированное покрытие будет обладать такими же свойствами, как и исходный материал-донор [2].

*Цель настоящих исследований* заключалась в сравнительной оценке триботехнических характеристик покрытий, сформированных методом ДПГИ из композиционных порошковых материалов-доноров на основе меди.

**Методика исследований.** В качестве материалов-доноров использовали спеченные смеси порошков меди М1 с легирующими добавками олова Sn, свинца Pb, графита С, дисульфида молибдена MoS<sub>2</sub> и алмазно-графитной шихты УДАГ в следующем соотношении: образец № 1 - Cu + до 10 масс.% Sn; образец № 2 - Cu + до 9 масс.% Sn + до 1 масс.% MoS<sub>2</sub> + УДАГ; образец № 3 - Cu + до 5 масс.% Sn + до 15 масс.% Pb + до 1 масс.% С + MoS<sub>2</sub>; образец № 4 - Cu + до 1 масс.% УДАГ. Для сравнения характеристик композиционных и однородных покрытий использовали также материал-донор из латунного проката Л63 (ГОСТ 15527-2004) – образец № 5.

Испытания проводили на автоматизированном трибометре одностороннего вращения, реализующем трение торцевой поверхности одного индентора-контробразца по плоской поверхности диска-образца с покрытием. В качестве образцов использовали диски диаметром 70 мм и толщиной 5 мм ( $Ra = 0,3..0,4$  мкм) из стали 45 объемной закалки (HRC 43.45) с покрытием из указанных материалов-доноров № 1-5. Контртело – полусферический индентор из стали 40Х объемной закалки до HRC 43...45. Испытания на трибометре проводились без смазки при относительной скорости скольжения индентора по диску – 0,01 м/с, величине удельного давления в зоне контакта – 35 МПа и продолжительности испытаний – 60 мин.

**Результаты испытаний.** Значения коэффициента трения и весового износа для всех испытываемых пар трения приведены на рисунке и в таблице. Из рисунка видно, что в парах трения с образцами с покрытием из материалов-доноров №1 и №4 зафиксирован самый низкий коэффициент трения: 0,155 - в начале испытания; 0,19 - после 60 мин трения. При этом в течение всего периода испытания процесс трения в обеих парах трения проходит стабильно, без резких скачков коэффициента трения. Пара трения с однородным покрытием №5 после 40 мин работы также вышла на установившийся режим, стабилизировав коэффициент трения на уровне 0,33. Весовой износ в парах трения с покрытиями №№ 1, 4 и 5 практически отсутствует (см. таблицу), что подтверждает работу этих пар трения в установившемся режиме.

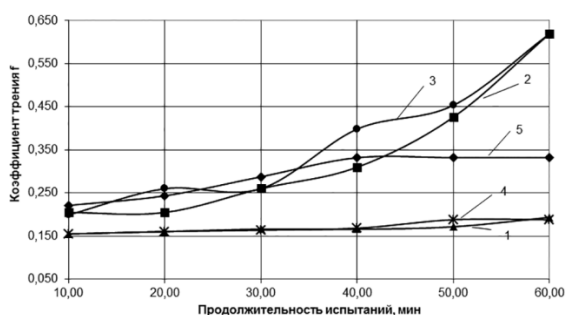


Рисунок – Зависимость коэффициента трения покрытий от времени

В паре трения с покрытием № 3 в первые 30 мин испытания коэффициент трения установился на уровне 0,26, однако затем начался его резкий рост, сопровождаемый износом как образца, так и индентора, и к концу испытания коэффициент трения в этой паре вырос до 0,62. К такому же значению коэффициента трения после 60 мин испытания вышла и пара трения с покрытием №2.

Таблица — Весовой износ образцов после 60 минут испытаний на трение

Весовой износ, г	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Образец с покрытием	0	0	0,00120	0,00030	0
Индентор	0	0,00040	0,00330	0	0,00030

**Заключение.** Результаты проведенных исследований позволяют заключить, что при использовании композиционных материалов-доноров, полученных путем спекания смесей порошков меди с легирующими добавками металлических (олова, свинца) и неметаллических (графита, дисульфида молибдена, алмазнографитной шихты УДАГ) порошков, для формирования покрытий методом ДПГИ на поверхности образцов из стали 45, пары трения с образцами с покрытием из материалов-доноров на основе меди и свинца (до 10 масс.%) и меди и УДАГ (до 1 масс.%) обеспечивают стабильный установившийся режим трения, с коэффициентом трения 0,16-0,19. Весовой износ в указанных парах трения практически отсутствует.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант Т21ЭТ—005).*

1. Металлические порошки и порошковые материалы / Б.Н. Бабич [и др.]; под ред. Ю.В. Левинского. — М.: ЭКОМЕТ, 2005. — 519 с.
2. Леванцевич, М.А. Улучшение плавности хода подвижных узлов станков формированием антифрикционных покрытий на направляющих скольжения / М.А. Леванцевич // Перспективные технологии. – Витебск, 2011. — С. 542-566.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ УПРОЧНЕННЫХ КОМБИНИРОВАННЫМИ СПОСОБАМИ ОБРАБОТКИ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

**Миранович А.В., Акулович Л.М.**

Белорусский государственный аграрный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Известно, что поверхности деталей под посадку слабо- и средненагруженных подшипников скольжения при работе в условиях трения и присутствия агрессивных и абразивосодержащих сред со смазкой или смазочным материалом с продуктами износа (частицами абразива) подвергаются интенсивному износу. Восстановление изношенных поверхностей таких деталей осуществляют, как правило, комбинированной упрочняющей обработкой, например, при совмещении способов магнитно-электрического упрочнения (МЭУ) с поверхностным пластическим деформированием (ППД) и МЭУ с термомеханической обработкой (ТМО) [1–3]. Следует отметить, что исследование триботехнических характеристик и механизма изнашивания при трении скольжения упрочненных комбинированными способами обработки в электромагнитном поле (МЭУ с ППД и МЭУ с ТМО) ранее не выполнялось.

**Цель исследований:** выполнить сравнительную оценку износостойкости поверхностей, упрочненных комбинированными способами обработки в электромагнитном поле, в условиях трения скольжения со смазочным материалом и смазкой, загрязненной частицами абразив. Исследования проводились на цилиндрических образцах (с наружным диаметром 40,0 мм, внутренним – 16,0 мм и высотой 12,0 мм) из стали 45:

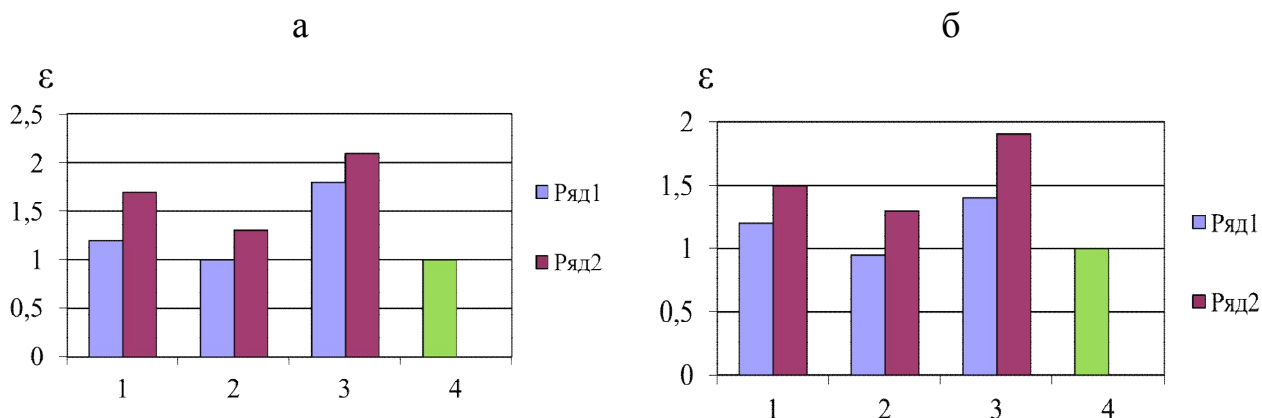
- с покрытиями, нанесенными из паст на основе эпоксидной смолы ЭДП, растворенной в жидком стекле (ТО РБ 02974150 – 015 – 99), включающих композиционные магнитные порошки (КМП) ФБХ-6-2, Fe-10%V и Fe-2%Ti, после последующей их обработки МЭУ с ППД и МЭУ с ТМО;
- закаленных с нагревом ТВЧ на глубину 1,2–1,6 мм до твердости 52–54 НРС (эталон).

Сравнительная оценка износостойкости при трении скольжения производилась на машине трения модели 2070 СМТ-1 по стандартной методике по схеме «диск-колодка». Контртело изготавливалось из чугуна ХТВ ГОСТ 3185-74. В качестве смазочного материала использовалось масло индустриальное И-Г-А-32 ГОСТ 14479.4-87, абразивом служили частицы кварцевого песка, измельченные до размера менее 30,0 мкм в количестве 0,05 – 0,25 г/см<sup>3</sup>. Изучение состояния изношенных поверхностей трения производилось с применением светового микроскопа Mef-3 (фирмы «Reichert-Jung»), цифрового фотоаппарата «HP photosmart 715 digital camera» и

растрового электронного микроскопа марки LEO 1455 VP фирмы «Карл Цейсс».

**Обсуждение результатов.** В результате исследований установлено, что наибольшей износостойкостью обладают покрытия из КМП ФБХ-6-2 (рисунок). Износостойкость этого покрытия значительно выше износостойкости эталона. Так, она в различных условиях изнашивания при трении скольжения в 1,48 – 1,85 раза больше для МЭУ с ППД и в 1,89 – 2,12 раза – для МЭУ с ТМО. Износостойкость покрытий из КМП Fe-10%V по сравнению с эталоном больше в 1,21 – 1,25 для МЭУ с ППД и 1,51 – 1,67 раза для МЭУ с ТМО. Покрытия из порошка Fe-2%Ti имеют износостойкость почти равную эталону.

Выявлено, что минимальный износ контртела и пары сопряжения получен для КМП ФБХ-6-2, что, вполне вероятно, обусловлено в первую очередь наличием в структуре покрытия остаточного аустенита – пластичной и более мягкой фазы, которая выполняет роль демпфера, снижающего динамические нагрузки на поверхность и ускоряет процесс приработки пары «образец-контртело». Положительная роль метастабильного аустенита состоит в том, что он не только хорошо сопротивляется абразивному изнашиванию, вследствие образования при трении в поверхностном слое мартенсита деформации, но и прочно удерживает от выкрашивания мелкие карбиды хрома и бора.



Условия трения скольжения:

а – со смазкой; б – со смазкой с частицами абразива

Рисунок – Диаграммы относительной износостойкости покрытий из КМП Fe-10%V (1), Fe-2%Ti (2) и ФБХ 6-2 (3), полученных МЭУ с ППД (Ряд 1), МЭУ с ТМО (Ряд 2), и эталона (4)

Таким образом, в порядке убывания износостойкости покрытий последние можно расположить в последовательности ФБХ-6-2 → Fe-10%V → Fe-2%Ti → сталь 45 (эталон). Следовательно, для пары трения, работающей при трении скольжения, следует использовать покрытия из КМП ФБХ-6-2, а для неподвижных соединений лучшими будут покрытия из КМП Fe-10%V и Fe-2%Ti.

Сопоставление результатов испытаний износостойкости покрытий из КМП, полученных комбинированными способами обработки в электромагнитном поле, показал, что разброс экспериментальных данных по величине дисперсии не превышает 12,3 % для МЭУ с ППД и 6,7 % – для МЭУ с ТМО. Это свидетельствует о более устойчивом и стабильном процессе упрочнения поверхностей МЭУ с термомеханической обработкой.

**Выводы.** В результате выполненных исследований:

1. Установлено, что МЭУ с ТМО покрытий из КМП ФБХ-6-2, Fe-10%V и Fe-2%Ti, полученных МЭУ, позволяет увеличить износостойкость поверхностей по сравнению с обработанными МЭУ с ППД в 1,1 – 1,3 раза.
2. Рекомендуется использовать для пары трения, работающей при трении скольжения, покрытия из КМП ФБХ-6-2, а для неподвижных соединений – покрытия из КМП Fe-10%V и Fe-2%Ti.

1. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Полоцк : ПГУ, 1999. – 240 с.
2. Богданович, Л.Н. Трение и износ в машинах / Л.Н. Богданович, В.Я. Прушак. – Минск : Вышэйшая школа, 1999. – 374 с.
3. Упрочняющая и финишная абразивная обработка в магнитном поле деталей сельскохозяйственных машин / Л. М. Акулович [и др.]; под редакцией Л. М. Акуловича. – Минск : БГАТУ, 2022. – 360 с.

**УДК 621.9.025.19**

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ СБОРНЫХ ФАСОННЫХ ФРЕЗ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

**Мирзомахмудов А.Р., Исаев А.В.**

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Российская Федерация

Сборные фасонные фрезы широко применяются в разных отраслях, например в железнодорожной промышленности. Существуют проблемы обработки фасонных деталей с прямолинейной направляющей (боковые бочкообразные профили рельсов, головки рельсов и др.), и фасонных деталей типа тела вращения (бандажи колесных пар), связанные с их высокой твердостью и неравномерным характером износа в виде ползуна, остроконечного наката гребня, навара и т.д. Таким образом, проектирование, разработка и оценка эксплуатационных характеристик конструкций сборных фасонных фрез со сменными многогранными пластинами для обработки вышеперечисленных деталей является актуальной задачей [1].

При проектировании сборных фасонных фрез со сменными многогранными пластинами исходными данными являются обрабатываемый материал и профиль бандажа (обода) колесных пар. Разработана

принципиальная блок-схема САПР сборной фасонной фрезы со сменными многогранными пластинами (рис. 1). Конструкцию сборных фасонных фрез со сменными многогранными пластинами следует рассматривать в виде системы отдельных, функционально связанных между собой конструктивных элементов, наглядно представленной в виде ориентированного графа [2].

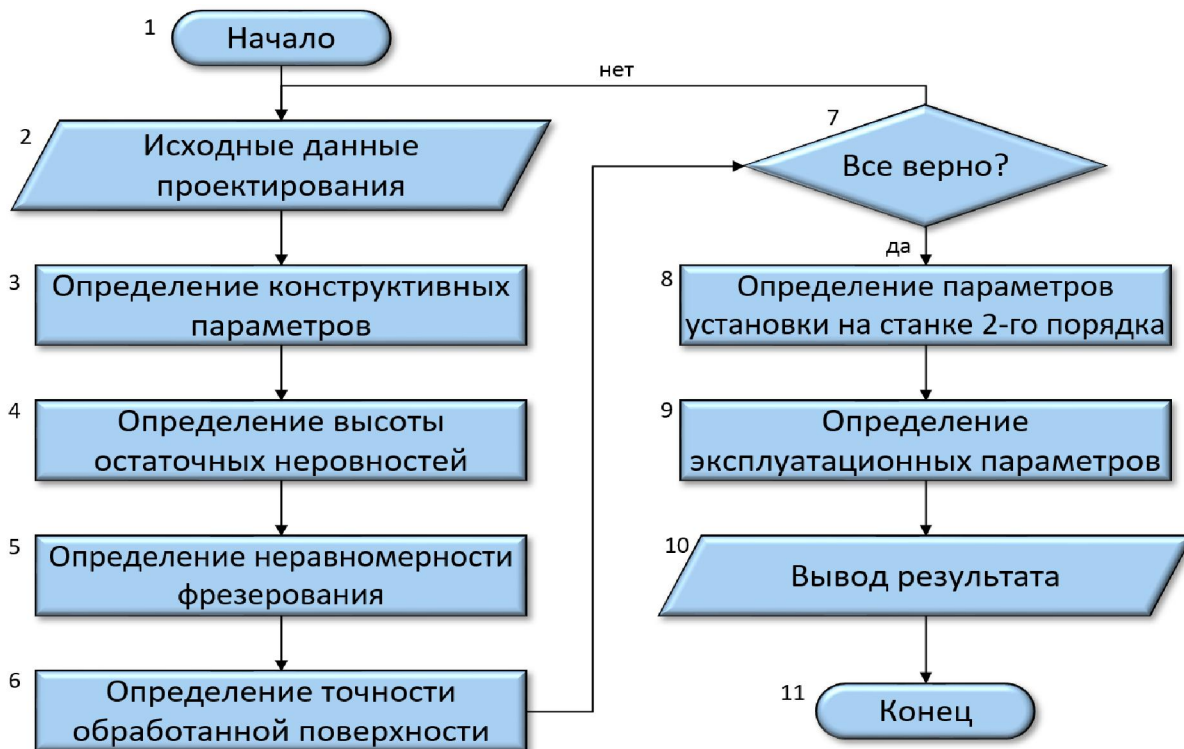


Рис. 1. Блок-схема САПР сборной фасонной фрезы

Графовая модель конструкции сборной фасонной фрезы со сменными многогранными пластинами позволяет произвести анализ составляющих элементов конструкции сборной фасонной фрезы, построить логическую схему найденного технического решения и оценить его эффективность (рис. 2). Также рассмотренная модель является открытой и может видоизменяться в соответствии с конкретными техническими требованиями без изменения начальной структуры.

С использованием разработанной математической модели и алгоритма проектирования была создана трехмерная параметрическая модель сборной фасонной фрезы со сменными многогранными пластинами для обработки бандажей колесных пар (рис. 3).

Получены 7 объектов интеллектуальной собственности, в том числе Евразийский патент на изобретение № 040649 от 11.07.2022 г.



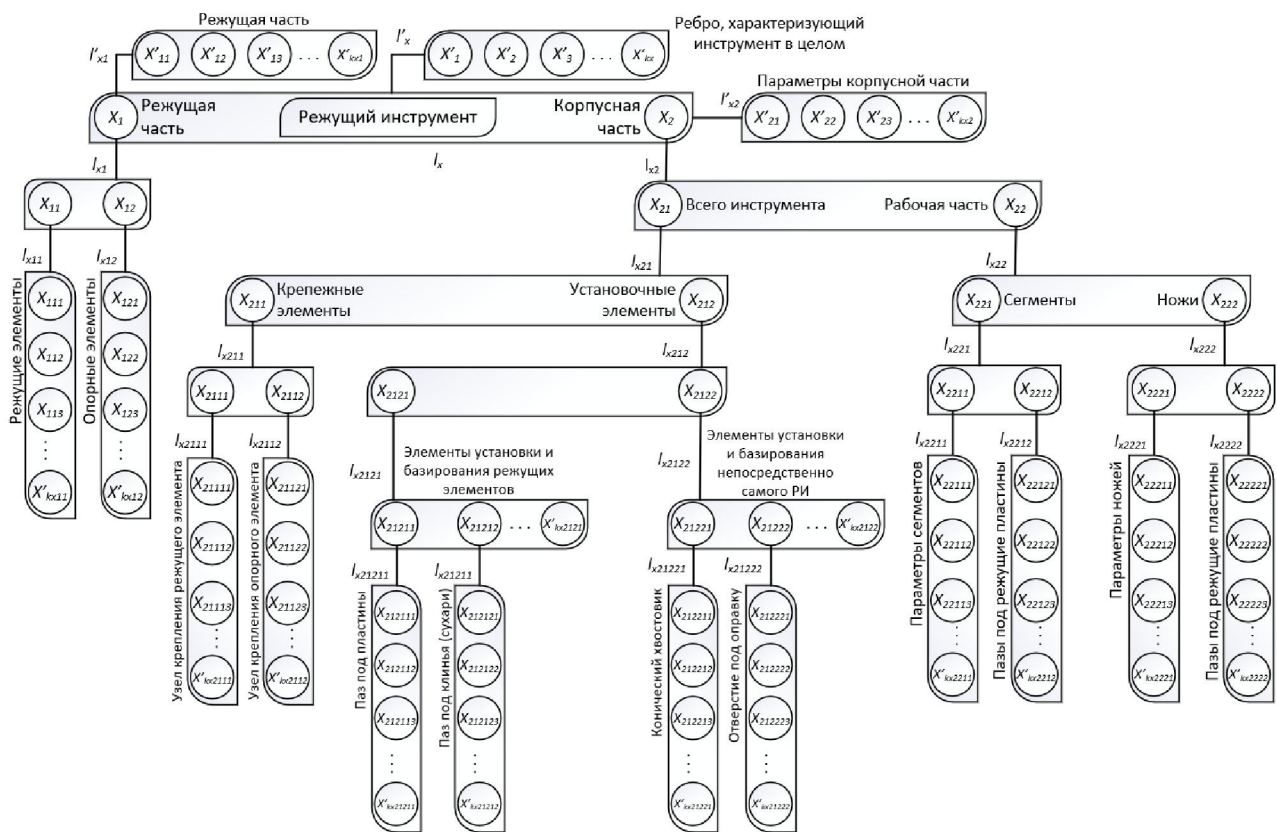


Рис. 2. Граф конструкции сборной фасонной фрезы

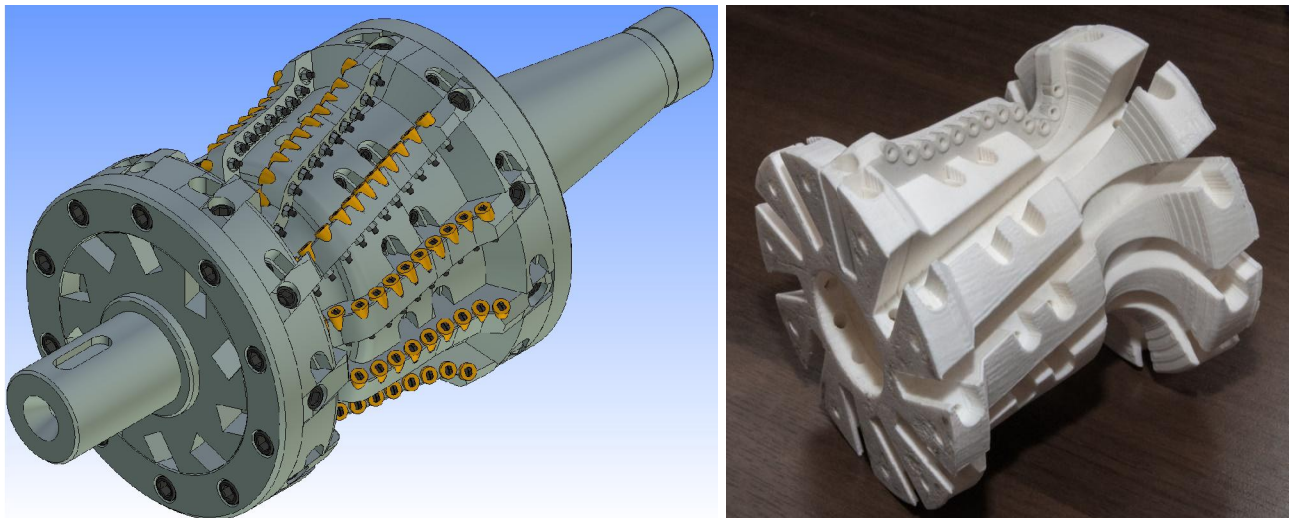


Рис. 3. Трехмерная модель сборной фасонной фрезы

1. Мирзомахмудов А. Р., Исаев А. В. Геометрическая модель сборной фасонной фрезы со сменными режущими пластинами для обработки колесных пар / Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2022. № 4 (63). С. 70–74.
2. Мирзомахмудов А. Р., Исаев А. В. Сборные фасонные фрезы для обработки деталей железнодорожной отрасли / Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2021. № 2 (57). С. 48–54.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРОВ НА ИХ ЖЕСТКОСТЬ

**Михайлов М.И., Лапко О.А., Михайлов К.М.**

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Полимерные композиционные материалы находят широкое применение в элементах различных конструкций. Они представляют собой гетерогенные, гетерофазные системы, свойства которых зависят от свойств исходных компонентов и параметров образующейся структуры [1,2].

Среди полимеров достаточно широко применяются эпоксидные смолы. Для эпоксидных полимеров вследствие наличия в них реакционноспособных гидроксильных и эпоксидных групп возможна их модификация с получением материалов с высокими показателями физико-механических свойств, что обеспечивает их перспективность среди других органических высокомолекулярных веществ.

Целью данного исследования является получение зависимости жесткости при сжатии от состава композиционного материала на основе эпоксидных смол. Исследования жесткости композиционного материала проводились в серии экспериментов при прикладывании сжимающей нагрузки. Испытания проводились на оборудовании INSTRON 5969 с предельной нагрузкой 50 кН. Размеры образцов: диаметр 9 мм, высота 15 мм. Сжатие производилось до максимальной нагрузки по прочности образца.

*Таблица 1- Факторы и уровни их варьирования*

Факторы	Полиэфирная смола, масс.ч.	Зернистость, мкм	Карбид кремния черный, масс.ч.
Обозначение	$x_1$	$x_2$	$x_3$
+1,215	32,72	271,5	16
+1,00	31	250	15
0,00	23	150	10
-1,00	15	50	5
-1,215	13,28	28,5	4

В качестве математической модели было выбрано уравнение второго порядка следующего вида [3]:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + a_{33}X_3^2$$

После определения численных значений коэффициентов уравнения регрессии, выявлялись по критерию Стьюдента. По данным результатов исследования составлялась таблица, в которую заносили значение жесткости образцов для каждого состава. Проверку гипотезы об адекватности модели выполняют по критерию Фишера. После проведения статистической обработки результатов эксперимента, преобразовав модель из кодированного вида, получили:

$$k = 7,348 - 0,081 \cdot x_1 - 0,007 \cdot x_2 + 0,157 \cdot x_3 + 0,00013 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,0075 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,002 \cdot x_1^2$$

На рисунке 1 приведены поверхности откликов варьруемых факторов. Полученные результаты позволяют заключить, что наибольшее влияние на коэффициент жесткости оказывает содержание полиэфирной смолы, так с увеличением ее содержания от 13,3 до 32,72 мас.ч. коэффициент жесткости уменьшался в 4,52 раза.

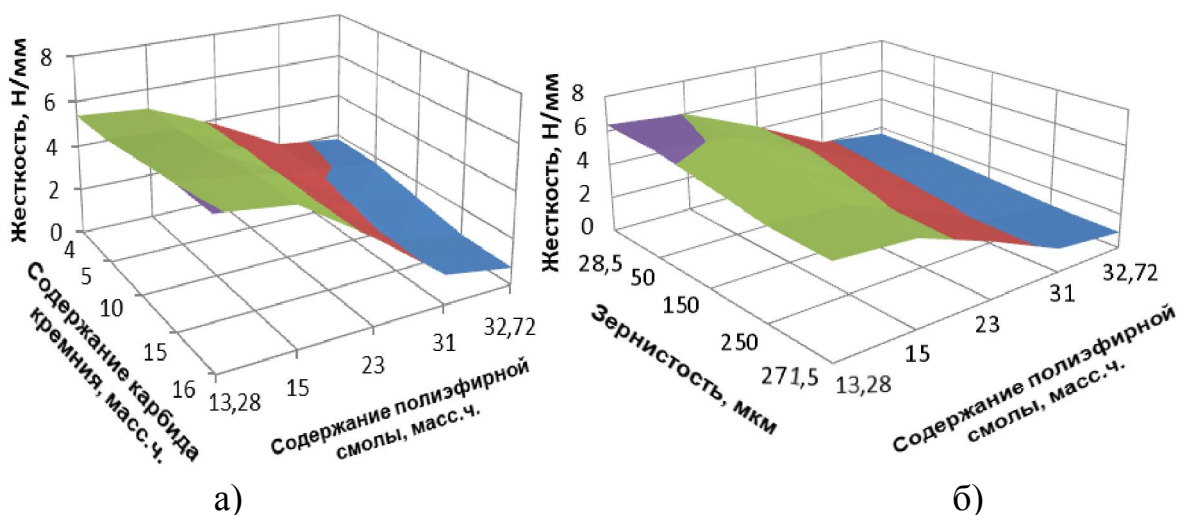


Рисунок 1 – Поверхности отклика жесткости образца в зависимости от следующих параметров: а – содержания полиэфирной смолы и карбида кремния в мас.ч.; б – содержания полиэфирной смолы в мас.ч. и зернистости карбида кремния

1. Чернин, И. З. Эпоксидные полимеры и композиции / И. З. Чернин, Ф. М. Смехов, Ю. В. Хирдов. – М. : Машиностроение, 1989. – 256 с.
2. Нильсон, Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций / Л. Нильсон. – М. : Химия, 1978. – 378 с.
3. Михайлов, М. И. Основы научных исследований и инновационной деятельности : учеб. пособие / М. И. Михайлов; М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2017. – 399 с.

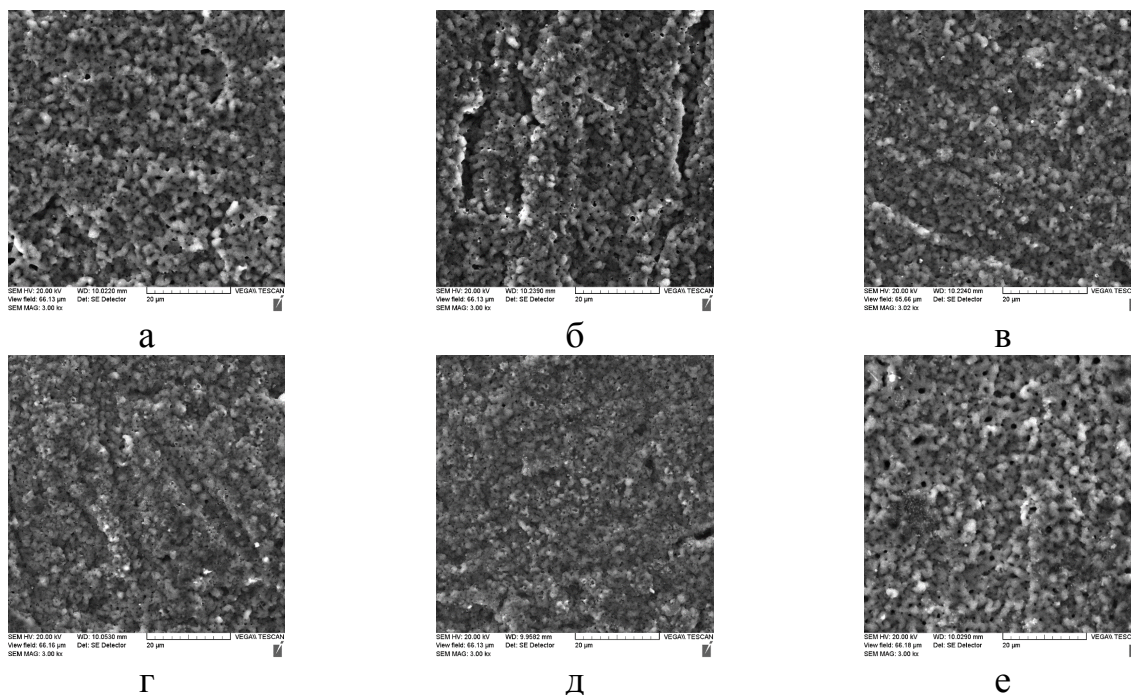
## ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ТИТАНА НА СТРУКТУРУ ФОРМИРУЕМЫХ ПОКРЫТИЙ

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

Для повышения производительности с возможностью управления структурой и свойствами формируемых оксидных слоев предложен метод микродугового оксидирования, основанный на использовании полностью управляемых по амплитуде и длительности разнополярных импульсов напряжением до 600 В с регулируемой частотой от 50 до 2500 Гц. В работе исследовалось влияние режимов высокочастотного импульсного МДО титана ВТ1-0 в электролите на основе ортофосфорной кислоты на морфологию формируемого оксидного слоя.

В качестве электролита использовался водный раствор  $H_3PO_4$  (1 % масс). Температура электролита составляла 25 °С. Для исследований использовались плоские образцы из титана ВТ1-0 с размерами 20x5x1 мм (площадь обработки 2,0 см<sup>2</sup>). Обработка образцов выполнялась в биполярном режиме при длительности импульсов 0,05 мс, 0,2 мс, 0,5 мс, 1,0 мс и 5,0 мс в форме меандра с коэффициентом заполнения 50 %. Амплитуда импульса положительного напряжения составляла 400 В, отрицательного напряжения – 50 В. Продолжительность обработки составляла 5 мин.

Электронные микрофотографии поверхности образцов при различных значениях длительности импульсов высокочастотного импульсного МДО представлены на рис. 1. Оксидная пленка на поверхности покрытия представляет собой относительно рыхлую структуру со множеством пор и бороздок, размеры и количество которых зависят от длительности импульсов технологического напряжения. Наибольшего размера бороздки достигают при длительности импульсов 0,2–0,5 мс и составляют 50–60 мкм. При длительности импульсов 0,1–0,05 мс бороздки существенно меньше и имеют длину 10–15 мкм. Установлено, что размер пор уменьшается при снижении длительности импульсов (рис. 2). Покрытия, полученные при длительности импульсов 5 мс представляет собой достаточно пористую структуру, в то время как при 0,05–0,2 мс пористость и размеры бороздок существенно меньше. Увеличение длительности импульсов технологического напряжения с 0,05 мкс до 5 мс приводит к росту размера пор с 0,5 мкм до 2,2 мкм соответственно.



а – 1, 0 мс; б – 0,5 мс; в – 0,2 мс; г – 0,1 мс; д – 0,05 мс; е – 5 мс;

Рис. 1. Электронные микрофотографии поверхности образцов из титана VT1-0 при различных значениях длительности импульсов

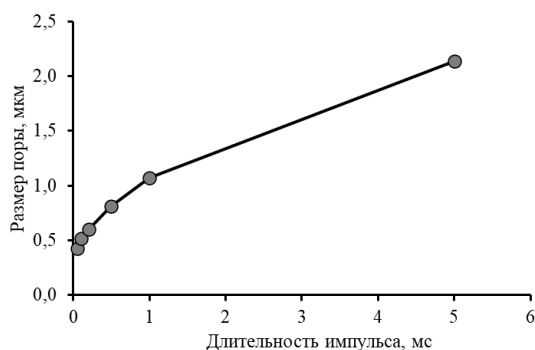


Рис. 2. Изменение размера пор в покрытии МДО в зависимости от длительности импульсов

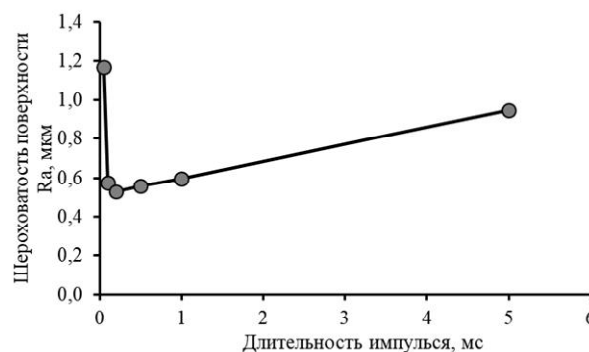


Рис. 3. Зависимость шероховатости поверхности оксидного слоя от длительности импульсов

Анализ зависимости на рис. 3 показывает существенную нелинейность шероховатости формируемого оксидного слоя от длительности импульсов. При малой длительности импульса (0,05 мс) происходит формирование неоднородной поверхности с высокой шероховатостью (до  $Ra = 1,2$  мкм). Такое состояние оксидного слоя связано, по-видимому, с недостаточным количеством энергии, поставляемой в зону обработки за малый промежуток времени и невозможностью образования относительно ровного покрытия. При большей длительности импульсов (0,1–1,0 мс) шероховатость значительно ниже и составляет  $Ra = 0,5$ – $0,6$  мкм. При дальнейшем увеличении длительности импульсов (до 5 мс) шероховатость увеличивается и достигает значения  $Ra = 0,9$  мкм.

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЧЕРНЫХ МДО-ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ

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

Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Республика Беларусь

В работе приводятся результаты исследования структуры и свойств черных керамических покрытий на алюминиевом сплаве АМг2, полученных методом микродугового оксидирования с применением силикатно-фосфатного электролита с добавлением ферроцианида калия в качестве окрашивающего компонента (рис. 1) [1].

Установлено, что с повышением содержания ферроцианида калия с 0,5 до 1,5 г/л наблюдается значительное снижение качества формируемых покрытий. Дальнейшее повышение концентрации ферроцианида калия не оказывает влияние на изменение шероховатости. Так повышение концентрации ферроцианида калия с 0,5 до 1,5 г/л приводит к увеличению шероховатости поверхности Ra с 1,08 мкм до 4,20 мкм (рис. 2).



Рис. 1. Внешний вид образца с полученным черным керамическим покрытием

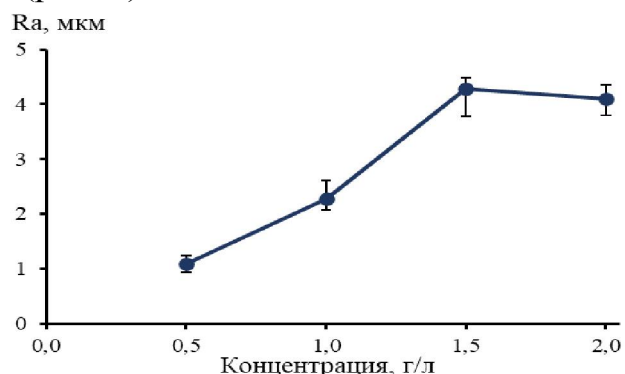


Рис. 2. Влияние концентрации ферроцианида калия на шероховатость покрытия

На рис. 3 представлены фотографии структуры поверхности и поперечного сечения полученного покрытия. Покрытие имеет глобулярную структуру с большим количеством пор, имеющих преимущественно размеры 0,5–3,2 мкм (рис. 3а). Установлено, что повышение содержания ферроцианида калия приводит к уплотнению структуры покрытий со значительным увеличением плотности и размеров глобулярных образований. Оксидный слой с общей толщиной 31 мкм включает относительно небольшой беспористый внутренний слой (1,5–2,5 мкм). Наружный слой имеет как продольные, так и поперечные (причем закрытые) поры с размером до 18 мкм. При этом в структуре наружного слоя присутствует большое количество мелких сферических пор с размерами 0,5–2,5 мкм (рис. 3б).

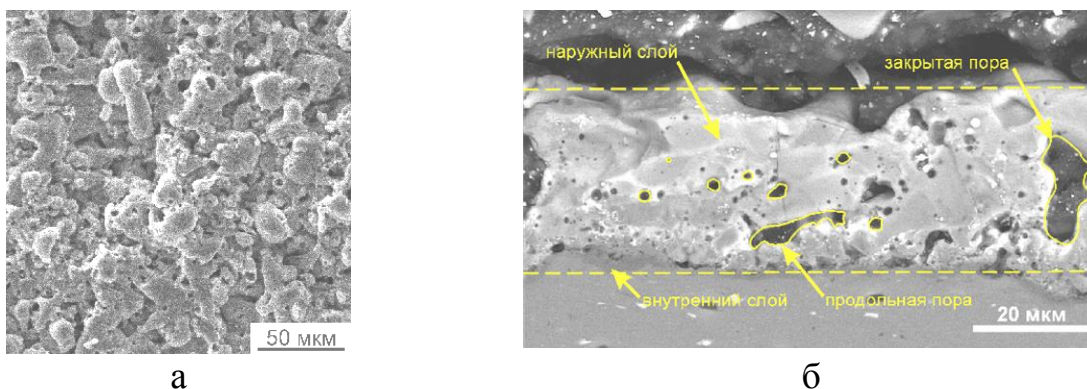


Рис. 3. Морфология и структура покрытия

На рис. 4 представлена зависимость, характеризующая влияние продолжительности обработки на скорость износа поверхности образцов. На начальной стадии обработки (1 мин) покрытия демонстрировали низкую стойкость к износу. При воздействии индентором из-за малой толщины покрытия продавливались в подложку или полностью изнашивались с дальнейшим износом подложки на относительно большую глубину – 24–26 мкм, что соответствует скорости износа  $3,0\text{--}3,4 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>3</sup>/м·Н. Максимальная износостойкость покрытий (скорость износа  $0,38\text{--}0,59 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>3</sup>/м·Н) была достигнута при обработке с продолжительностью 10 мин. Дальнейшее увеличение продолжительности обработки существенным образом не оказало влияние на скорость износа.

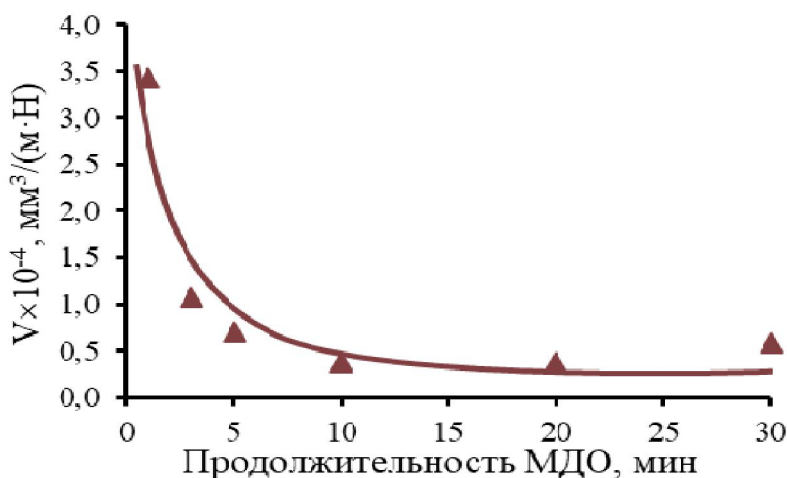


Рис. 4. Влияние продолжительности МДО на скорость износа поверхности

1. Нисс В.С., Алексеев Ю.Г., Королёв А.Ю. Структура и свойства оксидных покрытий, полученных высокочастотным микродуговым оксидированием // Интеграция науки, образования, производства – залог прогресса и процветания: Сбор. материалов МНТК, посвященной 5-летию основания Новайского отделения Академии наук Республики Узбекистан, 9-10 июня 2022 г. / г. Навои, Республика Узбекистан, в трёх томах. – Навои, 2022. – Т. 3. – С. 115-119

## СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ МИРОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ И РОБОТИЗАЦИИ

Околов А.Р., Груша Ю.А.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

К автоматизации и роботизации в мире относятся как к критическим, прорывным, перспективным, инновационным областям исследований и инструментам повышения эффективности производства, труда, конкурентоспособности продукции и услуг. Глобальный тренд на использование робототехнических решений в скором времени станет обыденным стандартом для большинства предприятий во всех отраслях промышленности. Наступлению такого переломного момента содействует, в первую очередь, повышение экономической эффективности роботов, т. к. стоимость разных компонентов и элементов систем снижается. В ближайшем будущем прогнозируется повышение роли сенсорных устройств с одновременным появлением самопрограммируемых роботов, что также скажется на уменьшении стоимости инженерных работ и периферийного оборудования, используемого в РТК. Усовершенствованные «органы чувств» роботов придадут им большую гибкость, скорость и ловкость.

Во-вторых, четвертая промышленная революция – «Индустрия 4.0», значительно поспособствовала развитию технологий коботов, поскольку эта концепция, позволяет реализовать сотрудничество человека и робота и подходит для гибких производственных систем. Третьей движущей силой роботизации является быстрый возврат инвестиций. Интеграция современных промышленных роботов в производство повышает производительность труда, снижает накладные расходы, обеспечивает гибкость, уменьшает количество отходов, и повышает качество готовой продукции. Многие производители инновационных роботизированных систем – Fanuc, Yaskawa, ABB, UR, Rethink, Baxter, – предлагают бюджетные и простые в эксплуатации модели роботов с низким сроком окупаемости, делая их доступными для небольших предприятий.

Несмотря на постоянно расширяющуюся область автоматизации в повседневной жизни и привычное использование обществом интеллектуальных устройств, нетипичные применения робототехники по-прежнему часто воспринимаются с большим скептицизмом. Самый распространенный миф о роботах заключается в том, что они займут рабочие места, оставив людей без средств к существованию. Но роботов кто-то должен спроектировать, произвести, продать, установить, эксплуатировать и обслуживать, – а это новые рабочие места, которые ранее не существовали; и эти рабочие места, как правило, высокооплачиваемы. Роботы, кстати, будут способствовать



сдерживанию текучки таких кадров, т. к. роботы позволяют компаниям оставаться конкурентоспособными, даже при сохранении производства в странах с высокой себестоимостью, и осуществлять решоринг – процесс возвращения в страну производства, ранее перенесенного в страны с более низкими издержками производства [1].

Между тем, автоматизация позволит миру справиться с глобальными проблемами – например, старением населения. В Японии уже сейчас каждому четвертому человеку за 65 лет. Согласно исследованиям, к 2065 году пожилые люди будут составлять почти половину населения страны. Именно автоматизация и роботы заменят недостающие трудовые ресурсы.

Одной из ключевых тенденций в сфере робототехники является растущее стремление инвесторов поддерживать стартапы. ABI Research сообщает, что общее финансирование венчурного капитала в индустрии робототехники подскочило на 38% в период с 2021 по 2022 год, в результате чего общий объем инвестиций достиг 6,5 млрд долларов США, что составляет более половины общих инвестиций в 2021 году [2].

Следует отметить, что для мирового бизнеса роботизация стала технологически новым способом наращивания капитала, для правительств – более эффективным способом решения политических и социально-экономических задач своих стран, для населения – возможностью сократить инвестиции и затраты своего труда в обмен на приобретение большего объема общественных и иных благ лучшего качества за меньшие деньги. Этот подход универсален для многих продвинутых рыночных экономик, и он находит отражение в мировых принципах технической политики в области автоматизации и роботизации.

Обзор тенденций и перспектив промышленной робототехники показывает, что применение промышленных роботов, которые обеспечивает снижение требований к интенсивному человеческому труду, сокращает производственные затраты и одновременно повышает качество готовой продукции, производительность, гибкость и безопасность значительно расширяется во многих странах.

1. Advanced Applications of Industrial Robotics: New Trends and Possibilities // Andrius Dzedzickis, Jurga Subačiūtė-Žemaitienė, Ernestas Šutinys, Urtė Samukaitė-Bubnienė, Vytautas Bučinskas [Electronic resource]. – 23.12.2022. – Mode of access: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/1/135>. – Data of access: 01.12.2022.
2. Executive Summary World Robotics – 2022 Industrial Robots [Электронный ресурс].–Режим доступа : [https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive\\_Summary\\_WR\\_Industrial\\_Robots\\_2022.pdf](https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_Industrial_Robots_2022.pdf). – Дата доступа: 15.12.2022.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ТОРЦОВО-ДИСКОВЫХ ФРЕЗ

Попок Н.Н., Хмельницкий Р.С., Анисимов В.С., Гвоздь Г.И.,  
Бабашинский М.А.

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой  
Новополоцк, Республика Беларусь

При изготовлении деталей на металлорежущих станках с инструментальными магазинами стремятся реализовать на одном рабочем месте как можно больше различных переходов с применением минимального количества режущих инструментов. Решение этой задачи возможно при использовании комбинированных инструментов, конструктивно сочетающих несколько типов режущих инструментов. Предлагаемые блочно-модульные режущие инструменты [1] позволяют за счет взаимозаменяемого унифицированного режцового блока производить растачивание, зенкерование, наружное и внутреннее фрезерование поверхностей деталей при минимальном количестве корпусных модулей, устанавливаемых в гнезда инструментального магазина.

Конструктивной особенностью комбинированной торцово-дисковой фрезы является выполнение отверстий в периферийной и торцевой частях корпуса однотипного размера, что позволяет устанавливать в них как унифицированный режцовый блок, так и зажимающие его элементы (рисунок 1).

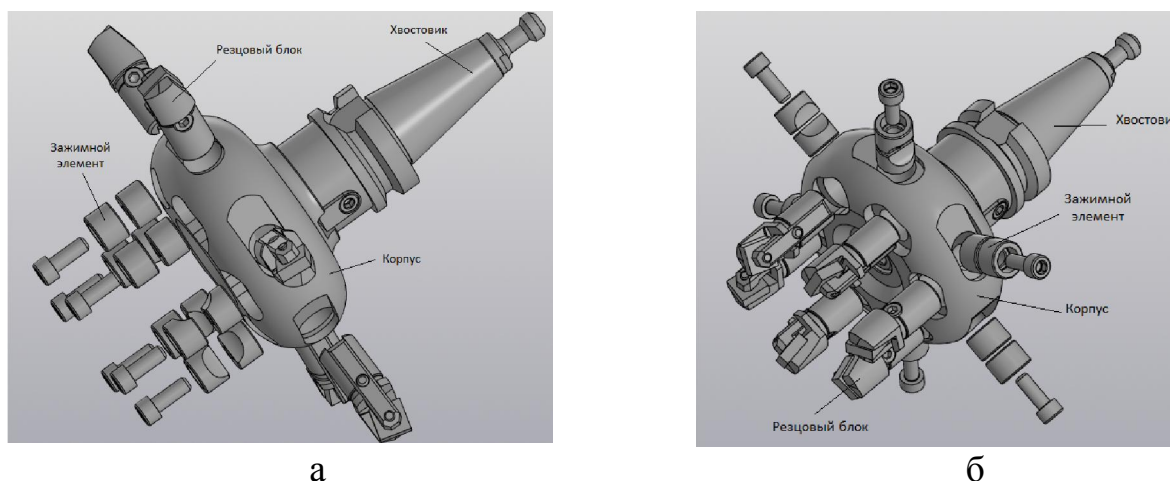


Рисунок 1 – Внешний вид комбинированной фрезы:  
а – дисковой; б – торцовой

Изготавливаются экспериментальные образцы комбинированных фрез как из металлических материалов (сталь 40Х), так и «гибридной» конструкции, включающие корпуса из пластикового материала (марки АВС), отпечатанные на 3-D принтере. В режцовые блоки устанавливаются пластины твердосплавные

(Т15К6) типа CNMG 05125-12 04 04. Типоразмеры и материалы пластины режущей могут использоваться и другие в зависимости от обрабатываемого материала, размеров конструктивного элемента и поверхности детали, режима резания, применения смазочно-охлаждающей технологической среды и т.д.

Для проверки работоспособности фрез проводится классический эксперимент, в котором диапазоны изменения скорости  $v$ , подачи на зуб  $S_z$  и глубины резания  $t$  выбираются по справочнику [2] и составляют:  $v=230\div305$  м/мин,  $S_z=0,06\div0,1$  мм/зуб,  $t=0,5\div1,5$  мм. При проведении эксперимента фиксируются минимальные  $N_{min}$  и максимальные  $N_{max}$  значения потребляемой мощности, определяется методом непосредственных измерений величина усадки стружки (коэффициенты утолщения  $ka$ , уширения  $kb$  и укорочения стружки  $kl$ ) и измеряется шероховатость обработанной поверхности (параметр  $Ra$ ) на профилографе-профилометре модели «Abris-7P». Для примера на рисунке 2 представлены отдельные зависимости характеристик обработки от режима резания.

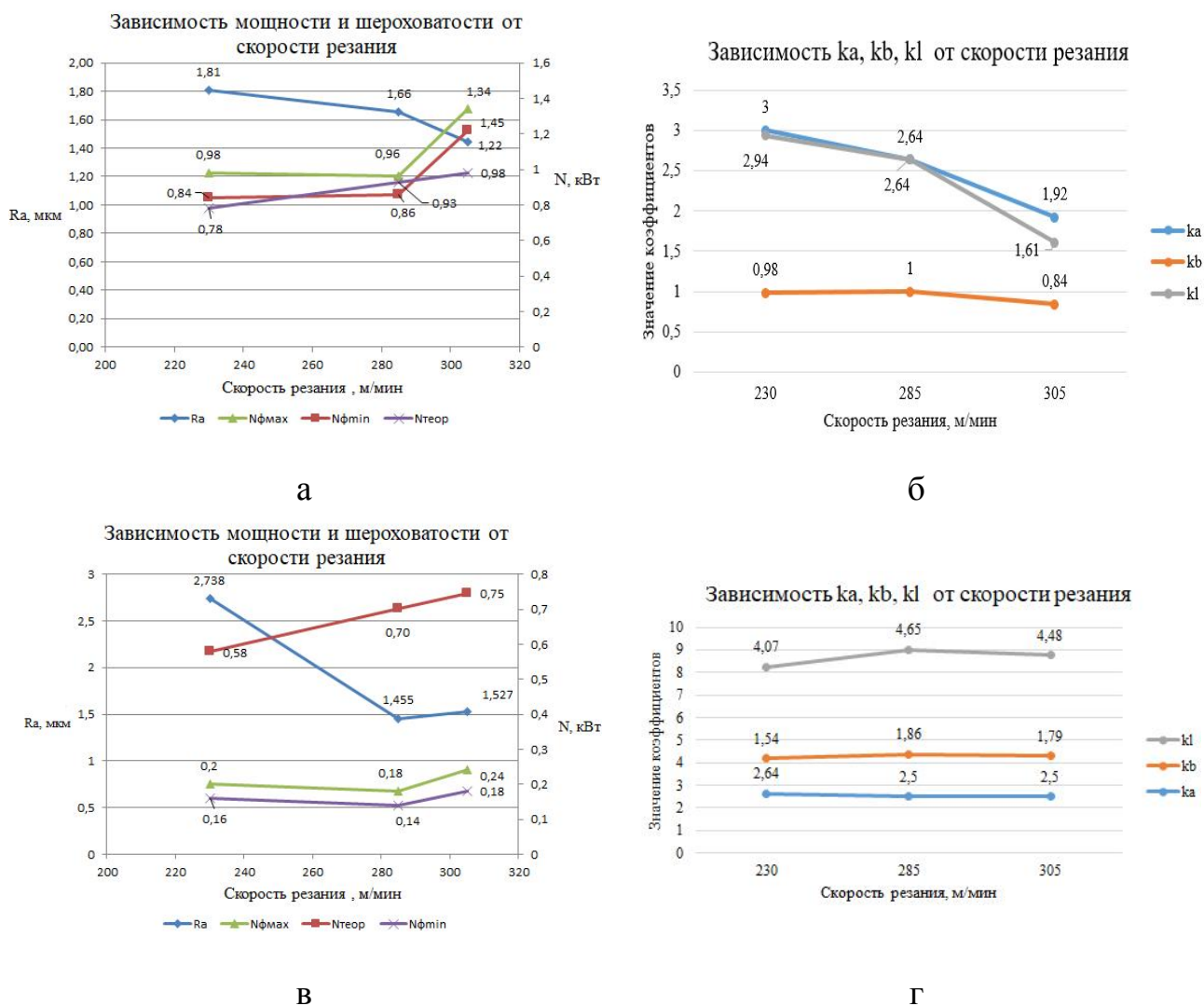


Рисунок 2 – Результаты экспериментальных исследований торцевой (а, б) и дисковой (в, г) фрез

Изменения деформационных и динамических характеристик обработки и параметра шероховатости поверхности  $Ra$  соответствуют классическим представлениям теории резания. Т.е. при торцовом фрезеровании с увеличением глубины резания  $t$  минимальные  $N_{min}$  и максимальные  $N_{max}$  значения фактической мощности резания увеличиваются и близки к теоретическим значениям  $N_{теор}$ ; показатели деформации  $ka$ ,  $kb$ ,  $kl$  и параметр шероховатости  $Ra$  поверхности не изменяются. С увеличением подачи  $Sz$  значения мощности  $N_{min}$ ,  $N_{max}$ ,  $N_{теор}$  и параметра шероховатости  $Ra$  возрастают, а значения  $ka$ ,  $kb$ ,  $kl$  – не изменяются. Рост скорости  $v$  приводит к увеличению мощности резания  $N_{min}$  и  $N_{max}$  и снижению коэффициентов усадки стружки  $ka$ ,  $kb$ ,  $kl$  и параметра шероховатости поверхности  $Ra$ .

При дисковом (плунжерном) фрезеровании с увеличением подачи  $S$  значения мощности резания  $N_{min}$ ,  $N_{max}$  и параметра  $Ra$  шероховатости поверхности возрастают, показатели деформации не изменяются. С увеличением скорости резания  $v$  значения мощности резания  $N_{min}$ ,  $N_{max}$  растут, параметр  $Ra$  снижаются, а  $ka$ ,  $kb$ ,  $kl$  не изменяются. При увеличении линейной скорости вращения фрезы мощность резания практически не изменяется, так как величины снижения силы резания и увеличения скорости резания сопоставимы и их влияние на изменение мощности резания несущественно ( $N=Pz \cdot v$ ). При плунжерном фрезеровании за счет направления движения подачи вдоль оси вращения фрезы  $Ds$  снижается радиальное отжатие фрезы по сравнению с торцовым фрезерованием, когда движение подачи  $Ds$  направлено перпендикулярно оси главного вращательного движения  $Dr$ . Некоторое увеличение параметра  $Ra$  шероховатости обработанной поверхности при плунжерном фрезеровании по сравнению с торцовым фрезерованием объясняется биением режущих кромок фрез: при плунжерном фрезеровании – 0,2-0,4 мм, при торцовом фрезеровании – 0,1-0,2 мм.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований подтверждают работоспособность предлагаемых комбинированных торцово-дисковых фрез, которые рекомендуются для дальнейших производственных испытаний.

1. Блочно-модульные режущие инструменты. Альбом : учебно-методическое пособие / Н.Н. Попок, В.А. Терентьев, Г.И. Гвоздь, С.А. Портянко. – Новополюцк: Полоц. гос. ун-т, 2021. – 164 с.
2. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001 г. - 944 с.

## ПРИМЕНЕНИЕ HARDWARE-IN-THE-LOOP ПОДХОДА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ДОВЕРЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Пушков Р.Л., Седьмов А.Э.

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,  
Москва, Российская Федерация

Разработка системы числового программного управления является сложной задачей, которая включает в себя не только создание программного обеспечения, но и организацию взаимодействия его с аппаратной частью станка [1, 2]. Разработанная система ЧПУ может обновляться за счёт добавления необходимых функций, модулей или циклов. Не всегда есть возможность протестировать разработанное ПО непосредственно на станке. Это связано с тем, что станок или иное техническое оборудование достаточно дорогостоящее, объем и время тестирования ограничено.

Тестирование возможно производить на специализированных испытательных стендах, которые реализованы в виде аппаратных средств, исполнительных механизмов в виде приводов, датчиков, программируемых логических контроллеров, различных реле и модулей человеко-машинного интерфейса. Для тестирования части добавленных функциональных возможностей достаточно использования виртуальных испытательных стендов, используя математическую модель аппаратной части станка, симулирующую работу исполнительных механизмов в реальном времени [3]. Одной из проблем является построение реконфигурируемых испытательных стендов для тестирования систем с оборудованием различных производителей.

Для тестирования программно-аппаратных комплексов применяется подход *Hardware-in-the-loop (HIL) simulation* (аппаратное моделирование в цикле). HIL-моделирование позволяет учитывать сложность управляемой установки за счёт добавления математического представления всех связанных динамических систем [4]. Моделирование HIL включает в себя электрическую эмуляцию датчиков и исполнительных механизмов. Электрические эмуляции действуют как интерфейс между моделируемой установкой и тестируемой системой. Значение величины каждого датчика с электрической эмуляцией контролируется моделированием установки и считывается тестируемой встроенной системой – обратной связью. Таким же образом тестируемая встроенная система реализует свои алгоритмы управления, выдавая управляющие сигналы привода. Изменения в управляющих сигналах приводят к изменениям значений переменных в математической модели установки.

Использование HIL повышает качество тестирования за счёт увеличения объема тестирования. Встроенная система должна тестироваться на реальной установке, но реальная установка накладывает ограничения на объем

тестирования. Симуляция тестируемой системы даёт возможность выходить за пределы диапазонов параметров моделируемого устройства.

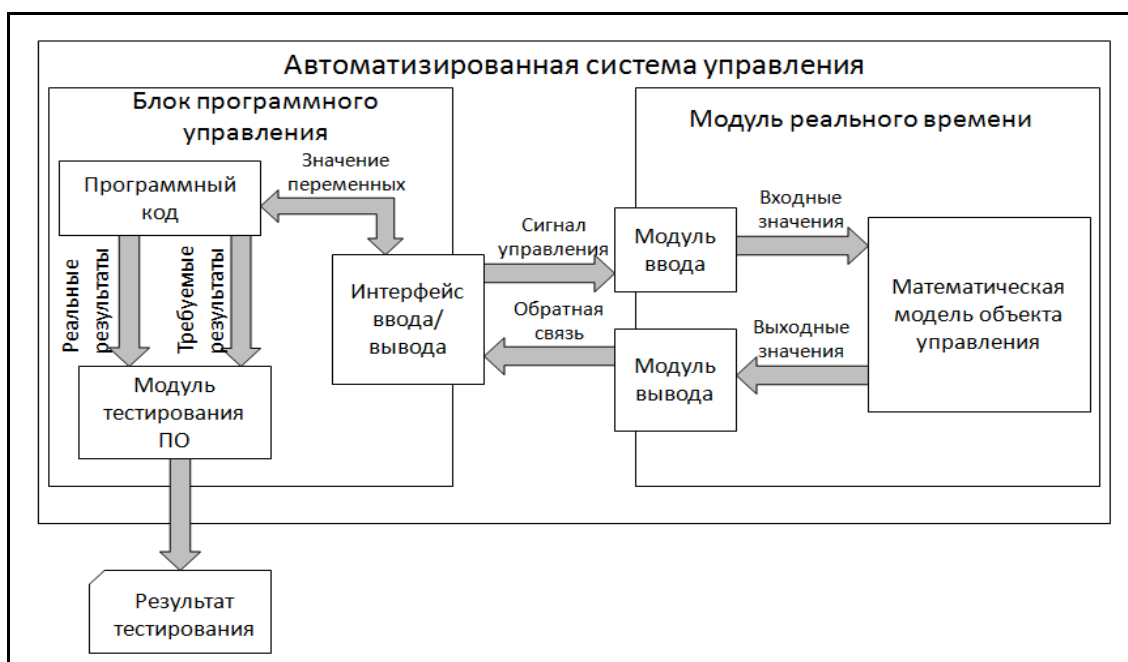


Рисунок 1 – Схема реализации тестирования кода программно-аппаратного комплекса ЧПУ

Еще одним направлением применения НПЛ может быть эмуляция оборудования вычислительного комплекса, на котором построена система управления. Это необходимо при построении доверенных систем. Доверенная система подразумевает, что её компоненты, наиболее критичные с точки зрения доступа у данным, не могут быть заменены или извлечены с сохранением доступа к данным. Для тестирования функций, отвечающих за доступ к доверенным данным НПЛ может быть одним из подходов, так как можно эмулировать смену оборудования вычислительного комплекса и проверять отклик системы на смену.

1. Мартинова Л.И., Мартинов Г.М. Мировые тренды, возможности и перспективы развития систем ЧПУ станочного оборудования // СТИН, №7. 2019. с. 28-31.
2. Мартинов Г.М., Пушков Р.Л., Соколов С.В., Обухов А.И., Евстафиева С.В. Числовое программное управление станками с динамически изменяющейся кинематикой // Автоматизация в промышленности, №5. 2020. с. 12-17.
3. Пушков Р.Л., Евстафиева С.В., Грубляк В.Я. Методика разработки имитационной модели станка для взаимодействия с системой ЧПУ // Вестник МГТУ "Станкин", №4(63), 2022. с. 50-57.
4. A. Palladino, G. Fiengo, F. Giovagnini and D. Lanzo, "A micro Hardware-In-the-Loop test system," *2009 European Control Conference (ECC)*, Budapest, Hungary, 2009, pp. 3833-3838, doi: 10.23919/ECC.2009.7074997.

## ПРИМЕНЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ДЛЯ ОТЛАДКИ ПРОГРАММ ЭЛЕКТРОАВТОМАТИКИ

Пушков Р.Л., Стрешина М.С.

Московский государственный технологический университет «Станкин»  
Москва, Российская Федерация

При вводе в эксплуатацию машиностроительного оборудования приходится решать две основные задачи: конфигурирование системы ЧПУ и разработку программы электроавтоматики. Если конфигурирование системы ЧПУ задача тривиальная и набор конфигурируемых параметров описывается в документации на программное обеспечение системы, то разработка программы электроавтоматики производится индивидуально для каждой модели станка и зависит от используемого электрооборудования.

На этапе внедрения разработки программы электроавтоматики для нового оборудования существует высокая вероятность возникновения ошибок. К тому же у разработчика может не быть постоянного доступа к оборудованию. Отсутствие технологического объекта требует от разработчика имитировать сигналы от датчиков или изменять соответствующие входные переменные в соответствии с алгоритмом функционирования объекта. Разработчик должен четко представлять себе, как работает технологический объект, чтобы имитировать сигналы в правильной последовательности и в нужных диапазонах, а также внимательно проверять реакцию программы на эти действия. В таких ситуациях могут помочь трехмерные модели технологического объекта, что позволяет значительно упростить процесс отладки ПЛК программы.

В качестве инструмента моделирования рассматривается среда разработки Unity, которая содержит в себе инструменты для работы с анимацией, графикой, физикой объектов в трехмерном пространстве [1]. Отладку приложения можно производить в окне приложения, тем самым сокращая время создания и тестирования проекта. Проект в Unity представляется совокупностью сцен, с конкретным набором объектов, скриптов, настроек. Трехмерные объекты располагаются в сцене проекта и взаимодействуют между собой с помощью скриптов, написанных на языке программирования C#.

Для управления моделью технологического объекта в сцене, достаточно получить доступ к памяти ядра контроллера, для изменения входов и чтения выходов ПЛК программы.

В качестве практической составляющей решения задачи был взят сложный с точки зрения управления механизм смены инструмента барабанного типа (рис. 1). Сложность управления данным технологическим объектом состоит в том, что необходимо не только подводить в точку смены нужный инструмент, но и синхронизировать работу таких механизмов, как опускание стакана и

поворот захвата. При неверной последовательности сигналов возможны столкновения компонентов и их физическое повреждение.

Применение модели в Unity позволяет отслеживать «пересечения» и производить отладку программы электроавтоматики без использования технологического объекта.

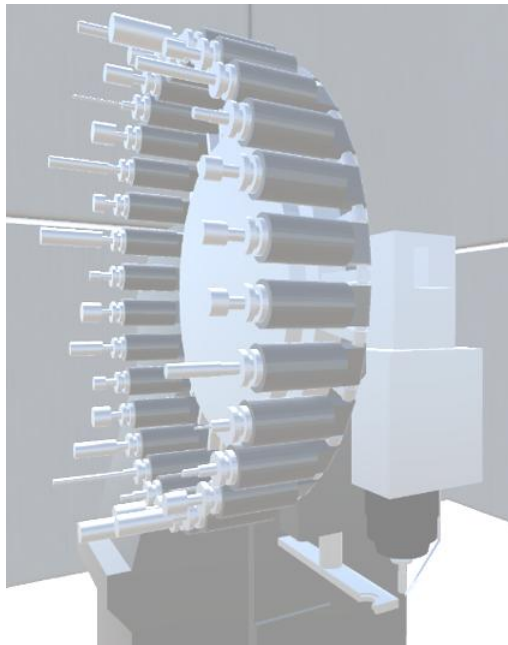


Рис. 1. Механизм смены инструментов

1. Пушков Р.Л., Евстафиева С.В., Грубляк В.Я. Методика разработки имитационной модели станка для взаимодействия с системой ЧПУ // Вестник МГТУ «Станкин», №4(63), 2022. – с.50-57.

**УДК 621.9.025.19**

## **РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ УЗЛА КРЕПЛЕНИЯ СМЕННОЙ МНОГОГРАННОЙ ПЛАСТИНЫ В КОРПУСЕ РЕЗЦОВОЙ ГОЛОВКИ**

**Романов В. Б., Троицкий А.К.**

ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», Москва, Российская Федерация

В сфере металлообработки с каждым годом проектируются новые конструкции инструмента и оснастки ради того, чтобы повысить производительность и автоматизацию того или иного процесса [1]. Крупные производители ввели инструментальную модульную систему для станков с ЧПУ. Она представляет собой инструментальный блок или державку, и к ним – ряд сменных резцовых головок, которые, в свою очередь, можно заменять под требуемый тип операции. Поскольку большинство станков ЧПУ оснащены токарной револьверной головкой под несколько позиций оснастки при помощи



встроенного привода, появилась возможность устанавливать оснастку под инструмент, характеризующийся вращательным движением. На основе привода инструментального блока разработана кинематика резцовой головки [2], где осуществляется автоматическое зажатие режущей пластины. Цель разработки – сократить вспомогательные время и повысить автоматизацию производства.

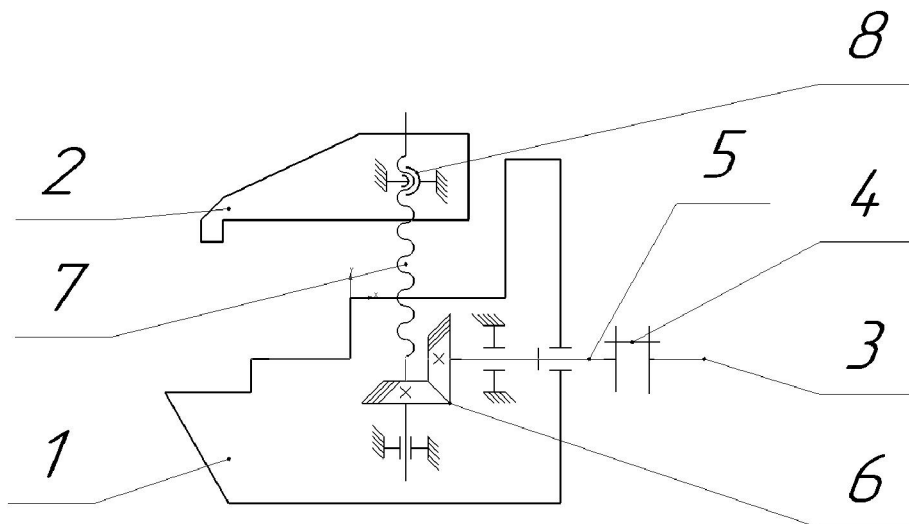


Рис 1. Кинематическая схема приводной резцовой головки

Принцип работы механизма заключается в передаче момента вращения с вала 3, который в свою очередь передаёт момент вращения на вал шестерни 5. Через соединение 4 вращательное движение далее проходит через коническую передачу 6 и переходит на ходовой винт 7. Далее ходовой винт 7 двигает маточную гайку 8, встроенную в корпусе клин-прихвата 2, тем самым опуская и притягивая сменную многогранную пластину (СМП) к корпусу головки 1 (рис. 1).

Резцовая головка (рис. 2) содержит паз для размещения СМП 3. Прихват 1 предназначен для жесткой фиксации СМП в пазу корпуса головки 2. Также в корпусе головки 2 выполнена полость для размещения червячной передачи, служащей для перемещения прихвата вверх и вниз за счет трапецеидальной резьбы на валу шестерни (представляет собой передачу винт-гайка). Головка в сборе крепится на станке ЧПУ с револьверной головкой с приводом. Оператор станка с ЧПУ, для установки СМП, прописывает на стойке станка команду вращения привода, где расположен инструментальный блок. Момент вращения с револьверной головки передается на предохранительный узел в корпусе блока, далее момент переходит на червячную передачу в полости резцовой головки, за счёт крутящего момента клин-прихват опускается, притягивая СМП к корпусу резцовой головки.

Использование предложенной конструкции позволит исключить ручной инструмент, а за счет автоматизации, смена СМП происходит быстрее, что сокращает вспомогательное время. На предложенное техническое решение подана заявка для получения патента.

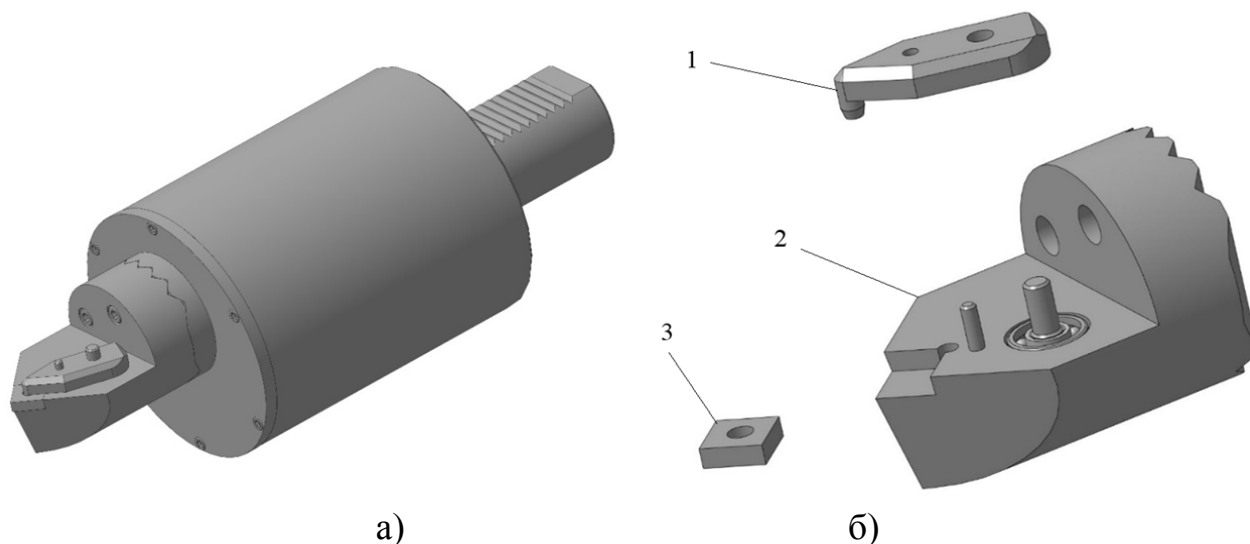


Рис. 2. 3D-модель приводной резцовой головки:  
а – вид в сборе; б – конструктивные элементы головки

1. Проектирование режущих инструментов: учебное пособие / В.А. Гречишников, С.Н. Григорьев, И.А. Коротков, А.Г. Схиртладзе. – Старый Оскол: ТНТ, 2014. – 299 с.
2. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т. Т. 1. – 9-е изд., перераб. и доп. / под ред. И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2006. – 928 с.

УДК 621. 791. 92

## **ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОПОКРЫТИЙ ПОСЛЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

**Сакович Н.А.**

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Повышение температуры вследствие преобразования механической работы в тепловую энергию может до некоторой степени характеризовать процесс изнашивания и в тоже время существенным образом влиять на интенсивность износа. При исследовании износостойкости важным показателем является температурное состояние трущихся поверхностей.

В настоящей работе было проведено исследование влияния поверхностной высокотемпературной термомеханической обработки (ПВ ТМО) на температуру нагрева образцов при трении. В качестве объекта исследования был выбран металл, наплавленный проволокой НП-65Г под слоем легированного флюса (С-0,51%, Cr-2%, Mn-0,91%, Si-0,46%). Наплавку производили на заготовки цилиндрической формы из нормализованной стали 40Х.

ПВ ТМО производилась по схеме: нагрев до температуры 1210...1230<sup>0</sup>К, поверхностная пластическая деформация путем обкатки роликом и немедленная закалка с последующим низкотемпературным отпуском. Поверхностную пластическую деформацию осуществляли путем обкатки роликом с оптимальным усилием обкатки 3000 Н. Технологические параметры обкатки: диаметр ролика – 100 мм, радиус деформирующей части ролика - 10мм, частота вращения заготовки – 320 мин, продольная подача - 0,95 мм/об.

Для нагрева заготовок использовалась высокочастотная установка ЛЗ2-67. Все образцы после закалки и ПВ ТМО подвергались низкотемпературному отпуску при температуре 473<sup>0</sup>К в течение двух часов. При этом твердость заготовок составляла HRC55..58.

Исследование температуры, возникающей при трении, проводилось на модернизированной машине трения МСТ-1 в условиях обильной смазки методом искусственной термопары [1]. При этом применялись образцы размером 5x5x10 мм, которые вырезались из закаленных заготовок, а также упрочненных ПВ ТМО. В качестве контртела применялись диски из чугуна ВЧ-10-4 с твердостью НВ 302...363. Шероховатость трущихся поверхностей образца и диска составляла Ra=0,16...0,32 мкм. В качестве смазывающей жидкости использовалось масло МГ-10.

С увеличением давления при трении температура образцов повышается. Более интенсивный рост температуры наблюдается у образцов закаленных с нагревом ТВЧ. Образцы, упрочненные ПВ ТМО, во всех случаях имеют меньшую температуру. Это можно объяснить уменьшением работы трения и увеличением износостойкости, являющихся следствием ПВ ТМО.

Микронапряжения или остаточные напряжения второго рода находятся в непосредственной связи со статической и динамической прочностью материалов. Поэтому определение величины и характера распределения напряжений в металлопокрытиях, упрочненных поверхностной высокотемпературной термомеханической обработкой (ПВ ТМО) с различными режимами деформирования представляет интерес в связи с тем, что уровень остаточных напряжений в металлопокрытиях влияет на технологические и эксплуатационные свойства материала.

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. Беляев Г.Я., Сакович Н.А. Триботехнические свойства металлопокрытий, упрочненных поверхностной термомеханической обработкой // Машиностроение. - Мн., 2000. - Вып.16. – С. 149-153.
4. Кончиц В.В. Электропроводность точечного контакта при граничной смазке // Трение и износ. 1991, т.12, №2. – С. 267-277.

УДК 621.923.7

## О МЕХАНИЗМЕ СГЛАЖИВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОМ ПОЛИРОВАНИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Синькевич Ю.В.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Механизм формирования поверхности при электроимпульсном полировании (ЭИП) включает физические, химические, геометрические и технологические аспекты, которые, как правило, взаимосвязаны и на сегодняшний день изучены недостаточно. В настоящее время существует ряд гипотез о механизме сглаживания неровностей поверхности в процессе ЭИП.

Согласно гипотезе, приведенной в [1], наиболее интенсивному воздействию микроразрядов и активированных ионов парогазовой оболочки (ПГО) подвергаются выступы профиля поверхности. Поскольку поверхность во впадинах профиля, по мнению авторов, частично пассивирована, то поверхность впадин в меньшей степени подвержена воздействию. Зеркальный блеск поверхности обеспечивается при равенстве скоростей образования и растворения тончайшей оксидной пленки на обрабатываемой поверхности. При этом физическая природа микроразрядов и активации ионов в ПГО не раскрывается.

Авторы работ [2, 3] полагают, что в ПГО в результате электрического разряда возникает плазма, высокая температура которой приводит к испарению металла на вершинах выступов профиля. Согласно [3], снижение шероховатости поверхности происходит вследствие того, что поверхность электролита на границе с ПГО является предельно гладкой, а обрабатываемая поверхность стремится повторить рельеф поверхности электролита, в результате чего высота неровностей на обрабатываемой поверхности стремится к минимуму.

Автор работы [4] на основании результатов экспериментальных исследований тепловых потоков, расчета теплового баланса процесса ЭИП и конечно-элементного моделирования распределения теплового поля при воздействии разряда на поверхность анода, считает, что под действием разряда в ПГО сглаживание шероховатости поверхности анода происходит в результате микро локальных испарений металла объемом  $2,26 \cdot 10^{-2} - 4,02 \cdot 10^{-2}$  мкм<sup>3</sup> на вершинах

выступов поверхности. В работе физическая природа разрядов в ПГО не раскрывается. В качестве подтверждения адекватности своей модели автор представил фотографию полированной поверхности образца из стали 12X18H10T, полученную с помощью атомно-силового сканирующего микроскопа. На фрагменте поверхности размером 50x50 мкм виден единственный вулканообразный выступ с кратером диаметром порядка 0,6–0,8 мкм. Однако в ряде работ других исследователей показано, что данный дефект поверхности связан с селективным растворением в процессе ЭИП структурных составляющих стали 12X18H10T, непосредственно примыкающих к карбидной фазе, и последующим удалением карбида в раствор электролита.

По мнению авторов монографии [5], при ЭИП сглаживание рельефа поверхности может обеспечиваться путем реализации двух механизмов. Во-первых, они считают, что при температуре газа в ПГО порядка 100°C высокая напряженность электрического поля способна вызвать ионизацию паров в ПГО и эмиссию ионов и электронов, необходимых для поддержания стационарного тлеющего разряда в оболочке, что обеспечивает электрическую проводимость ПГО и вызывает ее свечение. При этом распределение напряженности электрического поля в ПГО точно соответствует форме рельефа обрабатываемой поверхности при максимальной напряженности поля на выступах профиля, в результате чего дополнительно возникают искровые разряды, в которых выделяется значительная энергия, приводящая к тепловому разрушению вершин выступов. Во-вторых, авторы полагают, что сглаживание шероховатости поверхности возможно путем анодного растворения неровностей по аналогии с электрохимическим полированием. В этом случае на выступах обрабатываемой поверхности с большим градиентом напряженности электрического поля оксидная пленка разрушается тогда, когда отрывающие усилия, создаваемые электрическим полем, превысят прочность сцепления пассивной пленки с поверхностью. При этом разрушение оксидной пленки происходит в первую очередь на выступах профиля поверхности, где оксидный слой наиболее тонкий.

Согласно [6], ПГО способствует протеканию на обрабатываемой поверхности интенсивных химических и электрохимических реакций, приводящих к анодному окислению поверхности. Авторы полагают, что разрушение оксидного слоя происходит в результате генерирования на поверхности анода множественных искровых разрядов, которые вследствие повышенной напряженности электрического поля происходят преимущественно на вершинах выступов неровностей, в результате чего достигается высокая скорость сглаживания неровностей и исключается точечное травление поверхности.

Гипотеза о тепловом разрушении преимущественно выступов на рельефе обрабатываемой поверхности под воздействием стримерных разрядов в ПГО предложена в работе [7], согласно которой стример зарождается на поверхности электролитного катода и движется в направлении вершины выступа на поверхности металлического анода (обрабатываемой детали). На заключительной стадии стримерного разряда формируется плазменный канал,

который под действием пинч-эффекта и обратного процесса расширения газа разрушается в виде взрыва на вершине выступа. Однако, как и в предыдущих гипотезах, базирующихся на электрических разрядах в ПГО, авторы не раскрывают возможный механизм появления свободных электронов на поверхности электролитного катода на границе с ПГО, без которых развитие электрических разрядов различной природы в ПГО невозможно.

Следует отметить, что приведенные гипотезы базируются на основных закономерностях электрических разрядных процессов и съема металла в условиях электролитного нагрева в катодном [8] и анодном [9] режимах обработки, электроэрозионной обработки и электрохимического полирования [10]. В общем случае они сводятся к тому, что напряженность электрического поля на вершинах выступов профиля поверхности должна быть значительно выше по сравнению с впадинами, в результате чего возникновение электрических разрядов наиболее вероятно на вершинах выступов. Кроме того, гипотезы ошибочно базируются на том факте, что на профилограмме реальной поверхности выступы имеют островершинный вид. На самом деле данный эффект связан с различием в масштабах вертикального и горизонтального увеличения профилограммы и показан на рисунке 1, из которого следует, что профиль реальной поверхности при одинаковых значениях вертикального и горизонтального увеличения имеет плавный, пологий вид.

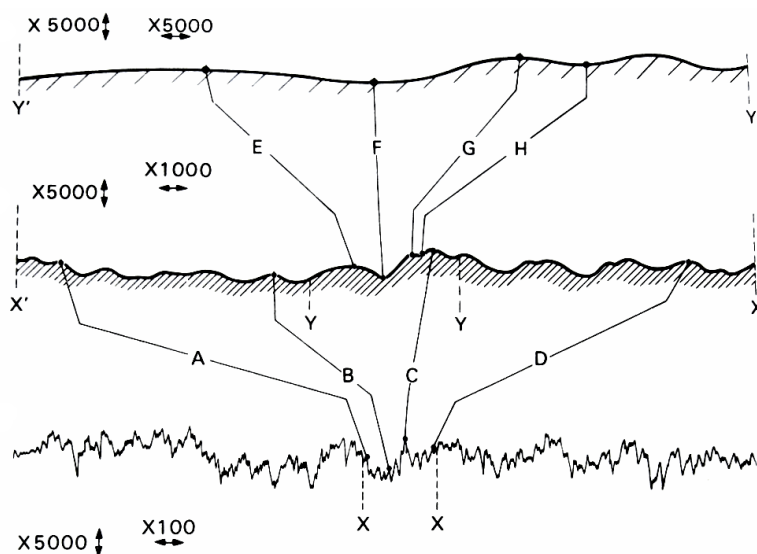


Рисунок 1 – Внешний вид профиля поверхности в зависимости от горизонтального увеличения профилограммы [11]

Учитывая рисунок 1 и тот факт, что ПГО представляет собой динамически устойчивую систему со средней толщиной, соизмеримой с высотой неровностей поверхности, можно предположить, что «пробой» ПГО может происходить с равной вероятностью, как на выступах, так и во впадинах профиля обрабатываемой поверхности в области случайных неоднородностей электрического поля. По этим причинам, а также в связи с отсутствием теоре-

тического и экспериментального обоснования приведенных гипотез о механизме сглаживания шероховатости поверхности в условиях ЭИП эти гипотезы представляются неадекватными.

Шероховатость поверхности является одной из основных геометрических характеристик качества поверхности и оказывает значительное влияние на эксплуатационные характеристики поверхности деталей. Создание обоснованной теории формирования топографии в условиях ЭИП станет возможно в результате проведения комплексных теоретических и экспериментальных исследований процесса ЭИП с учетом всего комплекса факторов, приведенных выше.

1. Электролитно-плазменное полирование // ОДО «СТЕКЛОВАК» [Электронный ресурс]. – 2004. – Режим доступа: <http://finishing.narod.ru>. – Дата доступа: 16.03.2023.
2. Podhorský, Š. The possibilities of plasma polishing of the steel DIN 1.0570 in electrolyte / Š. Podhorský, A. Malík // METAL 2010: 19th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, Rožnov pod Radhoštěm, Czech Republic, May 18th – 20th 2010 [Electronic resource]. – 2011. – Mode of access: <http://www.metal2011.com/en>. – Date of access: 16.03.2023.
3. Хмыль, А.А. Влияние метода полирования стали на шероховатость и эксплуатационные свойства контактных поверхностей / А.А. Хмыль [и др.] // Трение и износ. – 1996. – Том 17. – № 4. – С. 491–496.
4. Новиков, В.И. Повышение эффективности изготовления сложнопрофильных деталей из легированных сталей методом электролитно-плазменного полирования: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.02.07 / В.И. Новиков; СПб гос. политехн. ун-т. – СПб, 2010. – 19 с.
5. Куликов, И.С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И.С. Куликов, С.В. Ващенко, А.Я. Каменев. – Минск: Беларуская навука, 2010. – 232 с.
6. Способ электрохимического полирования изделий из хромоникелевых сталей: пат. 2118412 РФ, МПК6 С 25 F 3/24 / А.С. Ставышенко, С.В. Скифский, П.Е. Наук; заявитель Тюменский гос. нефтегаз. ун-т. – № 97106310; заявл. 24.04.97; опубл. 27.08.98 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 1998.
7. Cornelsen, M. Electrolytic Plasma Polishing of Pipe Inner Surfaces / M. Cornelsen, C. Deutsch, H. Seitz // METAL [Electronic resource]. – 2017. – Volume 8. – Issue 1. – Mode of access: <https://www.mdpi.com/2075-4701/8/1/12>. – Date of access: 16.03.2023.
8. Cionea, C. D. Microstructural evolution of surface layers during electrolytic plasma processing / C. D. Cionea. – The University of Texas at Arlington: Cristian Cionea. – 2010. – 137 p.

9. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов: в 2 т. / И.В. Суминов [и др.]; под общ. ред. И.В. Суминова. – М.: Техносфера, 2011. – Т. 1. – 464 с.
10. Попилов, Д.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: Справочник / Д.Я. Попилов. – М.: Машиностроение, 1982. – 400 с.
11. H. Dagnall, M.A. Exploring surface texture / M.A. H. Dagnall. – LEICESTER, ENGLAND: RANK TAYLOR HOBSON, 1980. – 170 p.

УДК 682.62.018.012

## **КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИМИЗИРОВАННЫХ МЕТОДИК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ**

**Соколовский С.С., Соломахо В.Л.**

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Проектирование методик выполнения измерений (МВИ) как одну из ключевых задач предполагает выбор лучшего варианта проектного решения из некоторой совокупности конкурирующих вариантов. В основу такого выбора предлагается положить квалиметрическое сопоставление всех выделенных возможных вариантов МВИ по целому ряду свойств, определяющих их качество, с последующим выделением превалирующего варианта по интегральному показателю качества измерений. Планируемый порядок решения данной задачи позволяет определить общую структуру системы информационной поддержки процесса автоматизированного проектирования МВИ, и выделить следующие основные модули, которые должны входить в эту структуру с существующими функциональными взаимосвязями между ними: **[Модуль 1]** - модуль классификации и кодирования контролируемых геометрических параметров деталей; **[Модуль 2]** - модуль классификации и кодирования типовых измерительных задач; **[Модуль 3]** - модуль типовых проектных решений МВИ; **[Модуль 4]** - модуль квалиметрического оценивания проектных решений конкурирующих вариантов МВИ. Обобщённая структурная схема предлагаемой системы представлена на рисунке 1. Согласно приведенной структурной схемы общий порядок функционирования такой системы следующий.

В первый модуль должна поступать исходная информация об измерительной задаче, подлежащей решению, на основании которой ей должен быть присвоен определённый код. Этот код, отражающий принципиальные особенности измерительной задачи, должен поступать на вход второго модуля, где на основании присвоенного рассматриваемой измерительной задаче кода



должны строиться нормативная и аналитическая модель измеряемого параметра, выступающие в качестве основы для проектирования МВИ. Эта информация должна поступать на вход третьего модуля, задачей функционирования которого является формирование набора конкурирующих вариантов схемных решений измерительной задачи и соответствующих методик выполнения измерений, а также аналитическое оценивание составляющих погрешностей измерения. Четвертый модуль системы, так называемый квалиметрический модуль, является завершающим и он предназначен для проведения квалиметрического оценивания конкурирующих вариантов МВИ, сформированных в третьем модуле, по выделяемым проектировщиком основным свойствам, определяющим качество измерений.

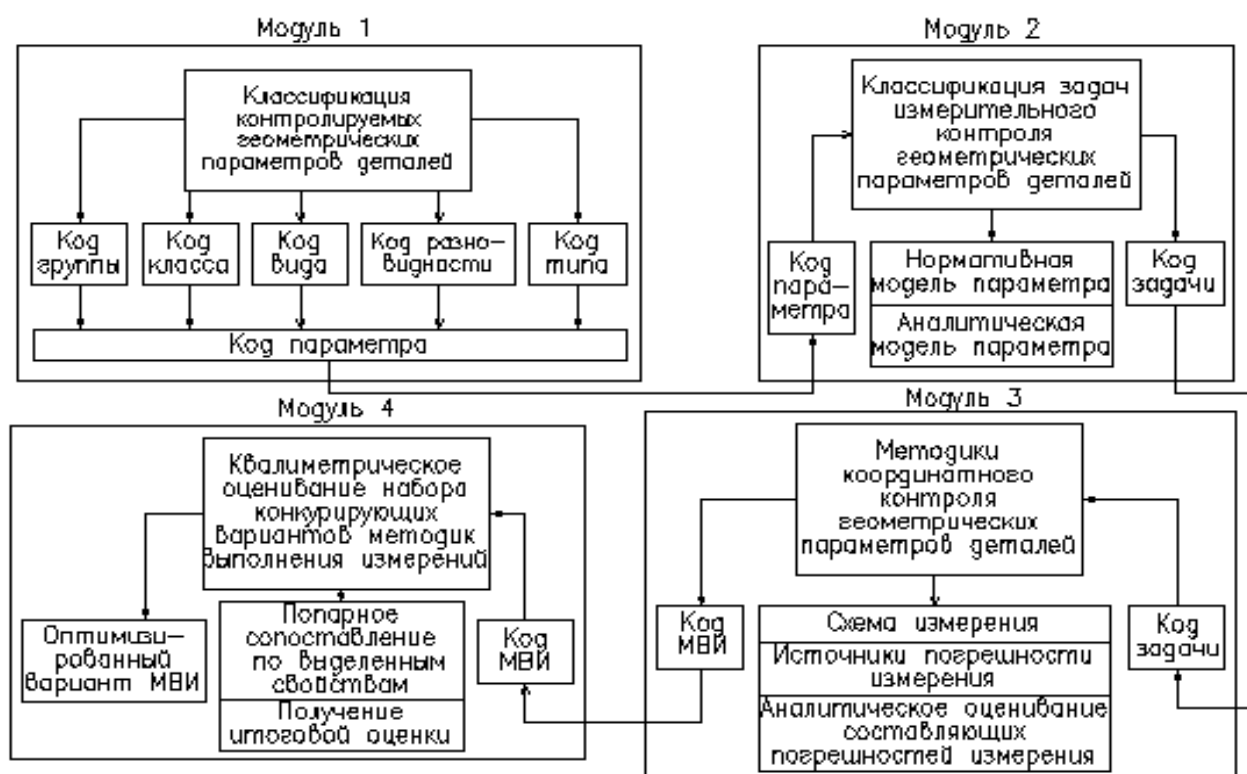


Рисунок 1 – Структура системы автоматизированного проектирования оптимизированных МВИ

Итогом этой работы должно быть определение наиболее эффективного или оптимизированного варианта МВИ. Критерием оптимизации при этом должно быть получение максимального значения комплексной обобщенной квалиметрической оценки, объединяющей в себе частные оценки ряда свойств, определяющих качество МВИ.

При работе в Системе проектировщик должен последовательно выполнить следующие действия или операции: 1) сформировать набор из предложенных в базе данных конкурирующих вариантов решения поставленной измерительной задачи; 2) выделить главные свойства, определяющие качество будущих измерений; 3) произвести попарное сопоставление всех рассматриваемых вариантов МВИ по всем выделенным

главным свойствам и рассчитать по предлагаемой специальной методике для каждого варианта проекта соответствующий ему индекс превалирования его по данному свойству над всеми остальными вариантами проекта; 4) произвести попарное сопоставление всех выделенных главных свойств по их важности или значимости в отношении качества МВИ в целом и рассчитать соответствующие им коэффициенты весомости; 5) произвести комплексирование полученных количественных оценок сопоставляемых вариантов МВИ по всем выделенным главным свойствам с учётом их коэффициентов весомости и рассчитать для каждого варианта комплексный показатель его превалирования над всеми остальными вариантами.

**УДК 004.054**

## **СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО НАПИСАНИЯ И ТЕСТИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ С ПОМОЩЬЮ САМ ПРИЛОЖЕНИЙ К КОМПАС 3D И ЭМУЛЯТОРОВ СИСТЕМ ЧПУ ООО БАЛТ-СИСТЕМ**

**Старовойтов Н.А. Рогов С.В.**

ООО Балт-Систем, Москва, Российская Федерация

**Введение.** Сегодня львиная доля всех управляющих программ написана с использованием САМ-систем. Это очень удобно для современных станков. Использование САМ-систем позволяет в разы уменьшить время написания управляющих программ, как для сложных деталей, так и для относительно простых. Помимо скорости написания увеличивается и точность обработки. Также внедрение САМ-систем позволило применить современные способы обработки, такие как высокоскоростное фрезерование и другие.

Современные САМ-системы используются при разработке сложных технологических процессов, а в металлообработке применяются, в основном, как средство синтеза программ для управления станками с ЧПУ и моделирования процессов обработки. Система рассчитывает траектории и относительное движение инструмента и заготовки. Благодаря наличию специального программного модуля, называемого постпроцессором, при построении управляющей траектории САМ-система учитывает особенности кинематики конкретного станка, на котором ведется обработка.

### **Модуль ЧПУ. Фрезерная обработка.**

Модуль ЧПУ. Фрезерная обработка — первое САМ-приложение, полностью интегрированное в систему трехмерного моделирования КОМПАС-3D. Приложение предназначено для автоматизации разработки управляющих программ для фрезерных станков с ЧПУ. С появлением приложения весь процесс от проектирования детали до передачи 3D-модели на станок с ЧПУ проходит в единой среде КОМПАС-3D. Для предприятия это означает

сокращение срока подготовки изделий к производству — нет необходимости экспортировать данные из КОМПАС-3D в САМ-системы, нет потерь времени на конвертацию и исправление ошибок при некорректной передаче. Нет даже вероятной возможности некорректной передачи данных, а это залог успеха! Упрощается и работа инженера-технолога — он использует одну 3D-систему, не отвлекаясь на сторонние приложения, и уверен в точности данных, на основе которых разработана управляющая программа. Работа приложения в составе КОМПАС-3D позволяет в автоматическом режиме перестраивать управляющую программу для станка с ЧПУ в случае изменения геометрии детали.

Основные возможности приложения:

- построение контуров обработки визуальным выбором поверхностей или эскизов непосредственно на трехмерной модели, созданной в системе КОМПАС-3D;
- автоматический расчет траекторий. Полученные траектории полностью ассоциативны с элементами 3D-модели;
- генерация управляющей программы в промежуточном коде на основе стандарта ISO;
- конвертация управляющей программы в коды конкретной системы ЧПУ с помощью постпроцессоров. В базовый пакет поставки входят постпроцессоры для следующих систем: Маяк 600Т, FANUC, SINUMERIK, FAGOR, CNC200 Балт-Систем;
- визуализация обработки в окне системы КОМПАС-3D с имитацией удаления материала и контролем процесса обработки.

Все операции выполняются в рабочем пространстве системы КОМПАС-3D с использованием элементов ее интерфейса (панель свойств, вкладка в дереве построения, панель инструментов). «Модуль ЧПУ. Токарная обработка» функционирует в составе 32 и 64-разрядной версии «КОМПАС-3D 19»

Приложение обладает большим набором многопроходных, сверлильных и резбонарезных стратегий. Поддерживается создание следующих видов обработки:

- многопроходная — наружное фрезерование, растачивание;
- контур — контурное фрезерование (как правило, черновое и чистовое);
- сверление — одно- и многопроходное сверление, центрование, обработка отверстий осевым инструментом;
- нарезание резьбы резцом — многопроходное нарезание резьбы резцом (цилиндрических, конических, торцевых поверхностей);
- нарезание резьбы метчиком — нарезание резьбы плашкой или метчиком.

Особенности приложения:

- использование параметризованных моделей инструментов и станочных приспособлений. В базовый комплект поставки входит набор готовых трехмерных моделей инструментов и приспособлений. При этом есть возможность создания пользователем собственных моделей;
- возможность включения в управляющую программу станочных циклов систем ЧПУ.

Для использования виртуальной системы ЧПУ серии NC200 производителем систем ЧПУ ООО «Балт-Систем» созданы программ-эмуляторы «EMUL\_NC2XX» для токарной и фрезерной обработки, с помощью которых можно тестировать, сгенерированные с помощью САМ приложений, управляющие программы на персональных компьютерах в среде Windows.

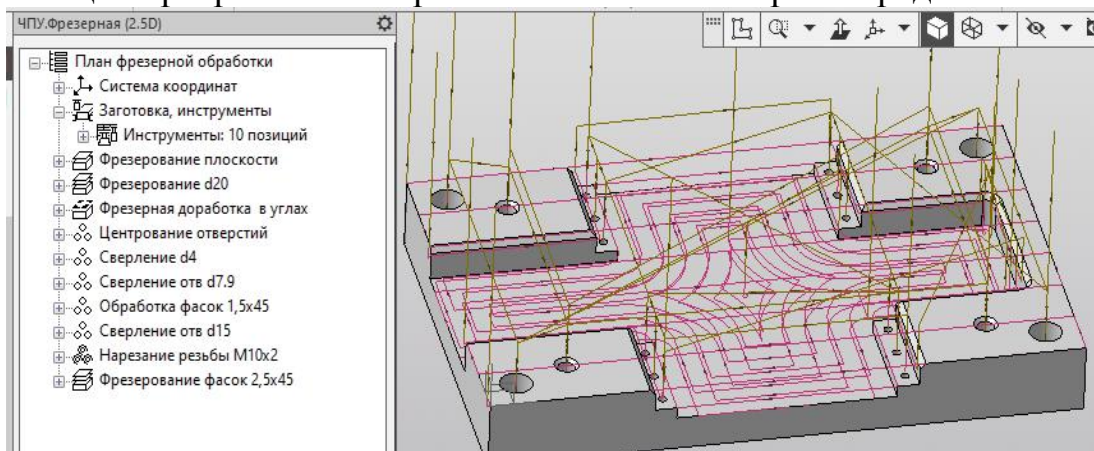


Рисунок 1. Пример набора многопроходных, фрезерно-сверлильных и резьбонарезных стратегий

1. Руководство программиста (УЧПУ NC-110, NC-201, NC-201M, NC-202, NC-210, NC-220, NC-230), Балт-Систем. – СПб., 2008. – Режим доступа: [www.bsystem.ru](http://www.bsystem.ru).
2. Старовойтов, Н. А. Технология обработки на станках с числовым программным управлением : электрон. учеб.-метод. комплекс дисциплины / Н.А. Старовойтов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2015. – Режим доступа: [elib.gstu.by](http://elib.gstu.by).
3. Старовойтов, Н.А. Разработка управляющих программ для токарных станков с ЧПУ: практикум по выполнению лабораторных работ для студентов специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения» днев. и заоч.форм обучения / Н.А. Старовойтов. – Гомель : ГГТУ им. П.О.Сухого, 2017. – 112 с.
4. Руководство оператора (УЧПУ NC-110, NC-201, NC-201M, NC-202, NC-210, NC-220, NC-230), Балт-Систем. – СПб., 2008. – Режим доступа: [www.bsystem.ru](http://www.bsystem.ru).
5. Старовойтов, Н.А. Программирование на языке высокого уровня GTL при разработке управляющих программ для сверлильно-фрезерно-расточных станков с ЧПУ, практикум по учебной дисциплине «Технология обработки на станках с ЧПУ» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О.Сухого» для специальности 1-36 01 01 – «Технология машиностроения» дневной и заочной форм обучения / Н.А.Старовойтов, Н.А. Е.Э.Дмитриченко - Гомель : ГГТУ им. П О Сухого, 2017. – 52 с.
6. САМ приложение «CNC Millx64» к графическому редактору «Компас 3Dv19», режим доступа, <https://kompas.ru>.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СБОРНЫХ ТОРЦОВО-ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ФРЕЗ

**Хлыстов Е.О., Исаев А.В.**

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Российская Федерация

Сборная торцово-цилиндрическая фреза повышает эффективность обработки металлов резанием. Использование корпусной фрезы с удлинённой

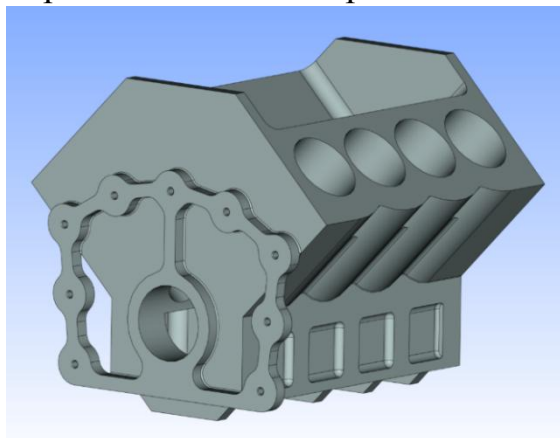


Рис. 1 – Блок цилиндров

режущей частью является общим для тяжёлых операций в производственных секторах: железнодорожная отрасль, авиационно-космическая техника, автомобилестроение. Данный тип фрезы подходит для обработки типовых поверхностей: паз, карман, уступ, плоскость – с большой шириной и глубиной резания в один проход [1]. В качестве обрабатываемой детали в работе выбран блок цилиндров (рис. 1). Режущими элементами являются сменные

многогранные пластины (СМП). Огромное разнообразие форм, размеров и покрытий СМП позволяет обрабатывать широкий ряд материалов [2].

В процессе анализа конструкций фрез используются элементы САПР (системы автоматизированного проектирования), что позволяет создавать 3D модели, чертежи, проводить расчет прочностных характеристик. Основой системы проектирования является алгоритм (рис. 2). Готовая 3D–модель параметризована, что позволяет получить конструкцию фрезы с различными параметрами (диаметр, количество зубьев, количество режущих рядов, углы резания, способ крепления фрезы на станке и т.д.). В качестве исходных данных модели можно использовать параметры фрезерования: ширину и глубину фрезерования, шероховатость, обрабатываемый материал.

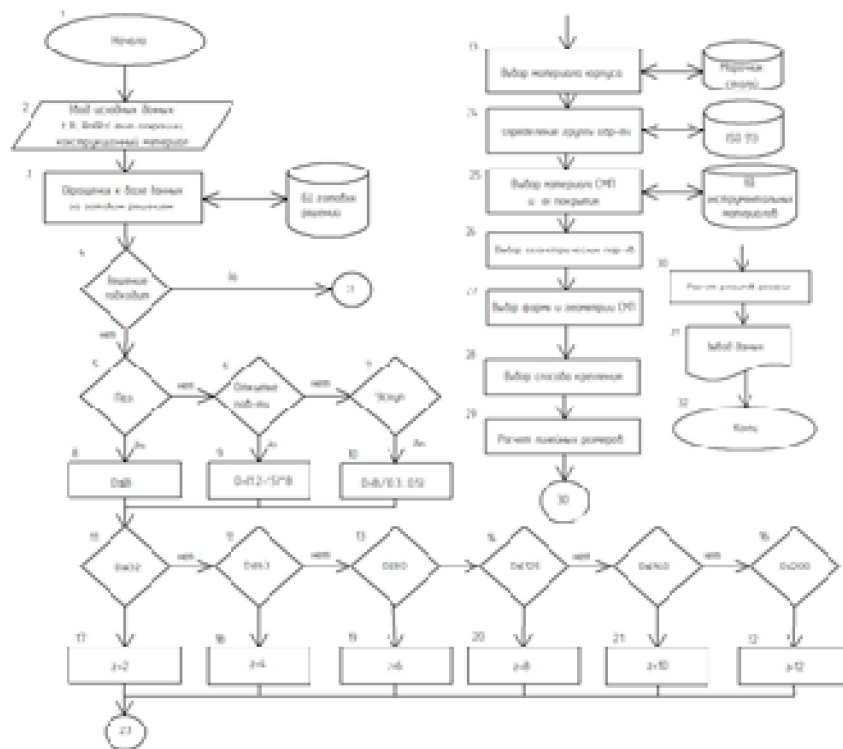
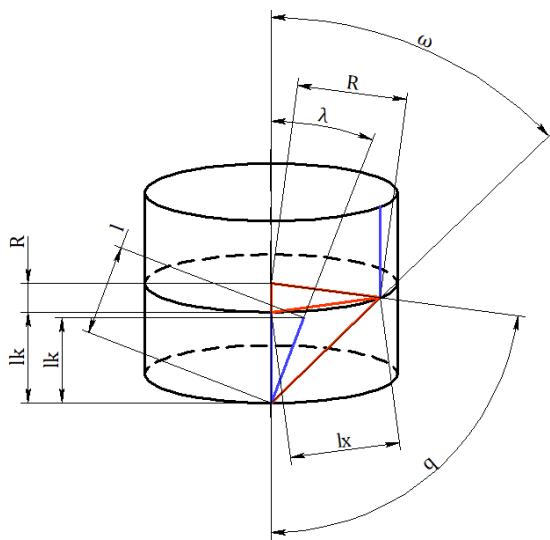


Рис. 2 Алгоритм проектирования фрезы

В процессе фрезерования немаловажную роль для обеспечения оптимальных параметров резания играет угол наклона стружечных канавок  $\omega$ . Этот угол также влияет на расположение СМП. Для задания необходимого угла



выведены формулы, по которым находится угол поворота  $\varphi$  каждого ряда пластин относительно предыдущего (рис. 3).

$$\varphi = \arccos \frac{lx^2 - 2R^2}{-2R^2}, \text{ где}$$

$R$  – радиус фрезы

$lx$  – хорда смещения,

$lx = lk \cdot \operatorname{tg} \omega$ , где  $\omega$  – угол наклона

стружечной канавки

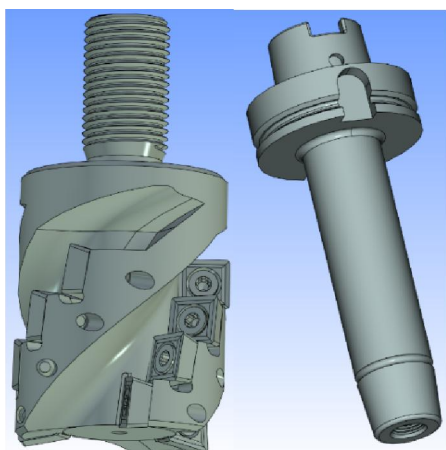
$lk$  – длина режущей кромки в проекции  $lk = l \cdot \cos \lambda$ , где

Рис. 3 Угол поворота верхнего ряда пластин

$l$  – длина режущей кромки СМП

$\lambda$  – угол наклона режущей кромки.

Полученная параметрическая модель (рис. 4, а) сборной торцово-цилиндрической фрезы позволяет произвести ряд технологических и конструкторских операций: симуляция обработки, расчет силовых факторов и расчет на прочность элементов фрезы. По окончании проектирования, в качестве примера, на 3D принтере напечатана фреза (рис. 4, б).



а



б

Рис. 4 а. 3D модель сборной торцово-цилиндрической фрезы; б. напечатанная модель на 3D принтере

1. Баранчиков, В.И. Справочник конструктора-инструментальщика – М.: Машиностроение, 1994. – 558 с.
2. Хает, Г.Л. Сборный твердосплавный инструмент – М.: Машиностроение, 1989. – 253 с.

УДК 536:621.9

## О ФИЗИЧЕСКОЙ СУЩНОСТИ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ МЕТАЛЛОВ ШЛИФОВАНИЕМ

**Шумячер В.М., Крюков С.А., Савчиц А.В.**

Волгоградский государственный технический университет,  
Волгоград, Российская Федерация

К числу важнейших физико-механических характеристик металлов и сплавов относится их обрабатываемость резанием. Абразивная обработка закладывает важнейшие физико-механические показатели поверхностного слоя заготовки : напряжения I и II рода, фазовый состав, структуру, шероховатость, длину опорной поверхности. В зависимости от состава обрабатываемого материала находятся такие важные показатели, как производительность (режущая способность), стойкость инструмента между правками (наработка). В этой связи значение обрабатываемости материала служит важным ориентиром для конструктора при проектировании детали. Отсутствие объективной информации об обрабатываемости создает, часто, непреодолимые трудности при разработки технологического процесса изготовления детали. Ранее выполненные исследования российскими учеными [1, 2] раскрыли причины различной производительности при шлифовании сталей различного химического состава. В работе [1] автор отметил, что обрабатываемость должна входить в состав основных физико-механических характеристик создаваемых металлургами

новых металлов и сплавов. Выполненные нами исследования позволили разработать модель абразивного диспергирования при шлифовании, которая описывает физическую сущность обрабатываемости, характеризуемую удельной энергией разрушения удаляемого припуска, являющейся интегральной фракцией режимов, характеристик инструмента и материала заготовки.

На основе результатов проведенных исследований были разработаны методики и сконструирована установка позволяющая определять обрабатываемость различных металлов и сплавов, абразивными материалами с учетом влияния состава и свойства смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) [3].

1. Корчак, С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М., Машиностроение, 1974. – 280с.
2. Ярославцев, В.М. Энергетические характеристики и динамика процесса резания [Электронный ресурс]: мультимедийное научное издание : электронное учебное издание / В.М. Ярославцев. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.
3. Пушкарев, О.И. Методы и средства контроля физико-механических характеристик абразивных материалов / О.И. Пушкарев, В.М. Шумячер. – Волгоград : 2004 (ОАО Альянс-Югполиграфиздат). – 142 с.

**УДК 536:621.9**

## **ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ МЕТАЛЛОВ**

**Шумячер В.М.,<sup>1</sup> Крюков С.А.,<sup>1</sup> Яцкевич О.К.<sup>2</sup>**

1)Волгоградский государственный технический университет,

Волгоград, Российская Федерация;

2) Белорусский национальный технический университет,

Минск, Республика Беларусь.

Шлифование металлов и сплавов сопровождается комплексом механо-химических процессов, протекающих в контакте «инструмент-заготовка», в результате которых происходит удаление припуска заготовки в виде стружки. Металлическая стружка образуется при шлифовании с энергетическими характеристиками превосходящими параметры взрыва химических взрывчатых веществ. По данным [1], при резании металлов объемное выделение энергии на порядок выше, чем при взрыве. Время отделения микростружки  $\sim 10^{-7}$ с. Давление в контакте «инструмент-заготовка»  $\sim 70$  ГПа, температура до 1500°К [2].

Изменение в процессе шлифования физико-механических характеристик металла можно рассматривать как внутреннюю реакцию на воздействие внешней энергии, подводимой инструментом. Как показал анализ шлифовальной стружки ШХ 15, ее размер  $\sim 150$  мкм (длина),  $\sim 0,5$  мкм



(толщина). В связи с тем, что стружка образуется в среде СОЖ, ее поверхность покрыта продуктами деструкции СОЖ, а сама она является результатом одновременного протекания процессов деформирования в условиях высоких давления и мгновенных высоких температур, что приводит к изменениям структуры и свойств, образованию новых фаз, измельчению зерен, формированию сверхтонкой субструктуры.

Шлифовальная стружка является ценным сырьем для порошковой металлургии, наполнителем композитов на полимерной связующей и т.д. Это позволяет перевести абразивную обработку в разряд безотходных производств.

1. Ярославцев, В.М. Новое о процессе резания // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение : 2000. №4. С. 32-46.
2. Ярославцев, В.М. Новое представление о металлической стружке. Электронный научно-механический журнал «Наука и образование», научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана – 2000, 8 с.