

*На правах рукописи*



Мустафаев Энвер Серверович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
КОНЦЕВЫХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ МИКРОФРЕЗ ЗА СЧЕТ  
ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ**

Специальность

2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической  
обработки

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

МОСКВА 2023

Работа выполнена на кафедре высокоэффективных технологий обработки федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН».

**Научный руководитель:** **Метель Александр Сергеевич**  
доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры высокоэффективных технологий обработки федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва

**Официальные оппоненты:** **Галиновский Андрей Леонидович**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой СМ12 «Технологии ракетно-космического машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва

**Вайнштейн Дмитрий Львович**  
кандидат технических наук, заместитель директора общества с ограниченной ответственностью Научно-техническое внедренческое предприятие «Поверхность», г. Москва

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа

Защита состоится 26 декабря 2023 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.332.01 при ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» по адресу: 127994, г. Москва, ГСП-4, Вадковский пер., д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» и на сайте: [https://stankin.ru/pages/id\\_115/page\\_1435](https://stankin.ru/pages/id_115/page_1435).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения (организации), просим направлять в диссертационный совет 24.2.332.01 по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря совета.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.332.01, к.т.н.

Е.С. Сотова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Микрофрезерование является высокоточной и гибкой технологией изготовления изделий сложной геометрии из различных материалов (металлов и их сплавов, полимеров, керамики, графита, композитов и т.д.) с относительно высокой скоростью съема материала. В настоящее время микрофрезы в основном используются для микрообработки ответственных изделий для нужд оптики, медицины, ядерной энергетики, аэрокосмической промышленности и микроэлектроники. Учитывая, что постобработка деталей после микрофрезерования чрезвычайно сложна, микрофрезерование в большинстве случаев является заключительным этапом производственного цикла изготовления изделий и поэтому к состоянию их поверхностного слоя предъявляются высокие требования.

Для повышения износостойкости дорогостоящих микрофрез на практике используются различные технологии модификации поверхности и нанесения износостойких покрытий. Осаждение покрытий на микрофрезы с использованием традиционных технологий направлено на повышение износостойкости контактных площадок инструмента, но при этом значительно увеличивает радиус скругления режущих кромок и изменяет исходные геометрические параметры микроинструмента. Увеличение радиуса скругления кромок приводит к деформации поверхностного слоя обрабатываемой заготовки в процессе резания, неблагоприятно влияет на условия стружкообразования, что заметно ухудшает состояние поверхности обработанной детали – повышается шероховатость и увеличивается размер заусенцев.

Разработка и исследование новых методов модификации поверхности микроинструментов, не приводящих к изменению их геометрических параметров и обеспечивающих повышение эксплуатационных показателей дорогостоящих микрофрез, в настоящее время является актуальной научно-практической задачей.

**Степень разработанности темы.** Проблемы, связанные с повышением стойкости микроинструментов, рассмотрены в трудах Балыкова А.В., Маслова А.Р., Козочкина М.П., Григорьева С.Н., Теплова Т.Б., Дьяконова А.А., Деревянко Д.И. и других российских ученых. Большой вклад в развитие знаний в области микрообработки внесли зарубежные исследователи Han J., Malayath G., Ma Y., Sahoo P., Patra K., Sun Q., Takács M., Aurich J.C., Wang F., Chen N. и др. Ими исследовано влияние модификации поверхности инструмента на размерную точность обрабатываемых деталей, изучены вопросы выбора рациональных толщин износостойких покрытий для повышения стойкости микроинструментов, выполнен анализ влияния покрытий на силовые параметры процесса резания и стружкообразование.

На сегодняшний день мало исследованными (для микрофрез диаметром не более 1 мм) являются вопросы влияния радиуса скругления режущих кромок на качество поверхности обработанных деталей, недостаточно изучено влияние различных процессов модификации на радиус скругления режущих кромок микрофрез и составляющие силы резания, возникающие при фрезеровании деталей. Кроме того, остаются востребованными эффективные и технологически доступные решения в области поверхностной модификации и нанесения износостойких покрытий, обеспечивающие повышение эксплуатационных показателей дорогостоящих микрофрез при сохранении их исходных геометрических параметров.

**Объектом исследования** являются твердосплавные концевые микрофрезы диаметром 1 мм, подвергнутые комплексной плазменно-пучковой модификации, включающей заострение режущих кромок пучками быстрых атомов и последующее осаждение износостойких покрытий из диборида титана ( $TiB_2$ ).

**Предметом исследования** являются эксплуатационные показатели (стойкость инструмента и качество обработанной поверхности) концевых микрофрез, подвергнутых комплексной плазменно-пучковой модификации, при обработке деталей из латуни.

**Целью настоящей работы** является повышение эксплуатационных показателей концевых твердосплавных микрофрез при обработке изделий из латуни за счет разработки технологии комплексной плазменно-пучковой модификации поверхностного слоя инструмента, включающей обработку пучками быстрых атомов аргона и нанесение вакуумно-плазменных износостойких покрытий  $TiB_2$ .

Для достижения указанной цели в работе необходимо решить **научные задачи**, перечисленные ниже.

1. Разработать и исследовать технологические возможности применения пучков быстрых атомов аргона для заострения режущих кромок твердосплавных концевых микрофрез (в том числе, диаметром не более 1 мм).

2. Разработать и реализовать технологию комплексной плазменно-пучковой модификации поверхностного слоя твердосплавных микрофрез, включающую заострение режущих кромок пучками быстрых атомов аргона и нанесение вакуумно-плазменных износостойких покрытий  $TiB_2$ .

3. Усовершенствовать вакуумно-плазменное оборудование и разработать технические решения для возможности проведения в едином технологическом цикле комплексной плазменно-пучковой модификации концевых микрофрез диаметром не более 1 мм.

4. Разработать модели для расчета силовых параметров при фрезеровании концевыми твердосплавными микрофрезами деталей из латуни, учитывающие влияние

факторов, связанных с размером радиуса скругления режущих кромок инструмента и режимами резания.

5. Выполнить стойкостные испытания исходных и модифицированных микрофрез при обработке канавок в деталях из латуни и провести сравнительную оценку их эксплуатационных показателей.

**Научная новизна работы** состоит в следующих результатах.

1. Разработаны и реализованы принципы заострения быстрыми атомами аргона режущих кромок твердосплавных концевых микрофрез, обеспечивающие для инструмента диаметром 1 мм снижение радиуса скругления с 4 мкм до 1 мкм.

2. Разработана и реализована технология комплексной плазменно-пучковой модификации твердосплавных концевых микрофрез, заключающаяся в заострении их режущих кромок воздействием пучками быстрых атомов аргона и нанесении на их рабочие поверхности износостойких покрытий на основе диборида титана ( $TiB_2$ ), позволившая увеличить эксплуатационные показатели микроинструмента (стойкость инструмента и качество обработанных канавок в деталях из латуни).

3. Установлены зависимости составляющих силы резания при микрофрезеровании деталей из латуни от факторов, связанных с размером радиуса скругления режущих кромок концевых микрофрез диаметром 1 мм и режимами резания.

**Теоретическая значимость** диссертации заключается в разработке принципов заострения быстрыми атомами аргона режущих кромок твердосплавных концевых микрофрез диаметром не более 1 мм, обеспечивающих снижение радиуса скругления с 4 мкм до 1 мкм.

**Практическая значимость работы** обусловлена следующим.

1. Усовершенствовано вакуумно-плазменное оборудование и разработаны технические решения, позволившие в едином цикле выполнять комплексную плазменно-пучковую модификацию твердосплавных концевых микрофрез за счет заострения кромок пучками быстрых атомов и последующего магнетронного осаждения износостойких покрытий  $TiB_2$ .

2. Установлены рациональные режимы выполнения комплексной плазменно-пучковой модификации твердосплавных микрофрез диаметром не более 1 мм.

**На защиту выносятся следующие положения:**

- Взаимосвязи радиуса режущих кромок твердосплавных концевых микрофрез и качества обработанной поверхности деталей из латуни.
- Зависимости влияния факторов, связанных с размером радиуса скругления

режущих кромок концевых микрофрез и режимов резания (подача, скорость резания, глубина), на составляющие силы резания, возникающие при микрофрезеровании деталей из латуни.

- Метод и технологические решения для комплексной плазменно-пучковой модификации концевых микрофрез, включающей заострение режущих кромок пучками быстрых нейтральных атомов аргона и последующее осаждение покрытий из  $TiB_2$ , обеспечивающих повышение эксплуатационных показателей инструмента.

**Методы исследования.** Фундаментальной базой при выполнении исследований являлись положения теории резания материалов, принципы генерации пучков быстрых атомов аргона с использованием плазмы тлеющего разряда и вакуумно-плазменного (магнетронного) осаждения износостойких покрытий.

При проведении экспериментальных исследований использовались сертифицированные методики и оборудование: определение толщины покрытий на микрофрезах осуществлялось посредством профилометрии на стилусном профилометре Dektak XT производства «Bruker»; измерения радиуса скругления режущих кромок выполнялись с использованием оптической измерительной системы MikroCAD premium+ производства «GF Messtechnik GmbH»; микроструктуру поверхностного слоя микрофрез изучали посредством сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на оборудовании PHENOM G2 PRO производства «PHENOM».

**Степень достоверности** подтверждается согласованием результатов теоретических исследований и экспериментальных данных. Для получения и обоснования результатов исследований в работе выполнен анализ большого массива научно-технической информации в области модификации поверхностного слоя изделий, который отражает результаты исследований наиболее авторитетных отечественных и зарубежных ученых.

**Апробация работы.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на проведение научных исследований в рамках государственного задания (проект № FSFS-2021-0006).

Основные положения диссертационной работы докладывались автором и обсуждались на следующих международных научно-технических конференциях:

- 5-я Международная конференция «Моделирование нелинейных процессов и систем» (МНПС - 2020), Москва, Россия, 16-20 ноября 2020 г.;
- 15-я Международная конференция «Пленки и покрытия – 2021», Санкт-Петербург, Россия, 18-20 мая 2021 г.;

- 16-я Международная конференция по модификации материалов пучками частиц и потоками плазмы, Томск, Россия, 2-8 октября 2022 г.;
- XIV Международная научно-техническая конференция «Трибология – машиностроению 2022», Москва, Россия, 12-14 октября 2022 г.

**Публикации.** Основные результаты исследований изложены в 20 научных работах, опубликованных в рецензируемых журналах и изданиях, индексируемых международными базами данных «Web of Science» и «Scopus». На технические решения, разработанные в рамках выполнения исследований, получены 6 патентов Российской Федерации на изобретения (№ 2726187, № 2726223, № 2752877, № 2778246, № 2794524, № 2797697).

**Соответствие паспорту специальности.** По теме и содержанию материалов диссертационная работа соответствует научной специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» в части пп. 2, 3 и 6 раздела «Направления исследований» паспорта.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка использованной литературы, содержит 134 страницы машинописного текста, в том числе 111 страниц основного текста, 63 рисунка, 20 таблиц и список литературы из 190 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы научная новизна, предмет и объект исследования, методы исследования, теоретическая и практическая значимость работы.

**В первой главе** приводится аналитический обзор особенностей процесса микрофрезерования и методов модификации и нанесения покрытий на микроинструменты.

В качестве характерных примеров применения микрофрез диаметром от 0,1 до 2,0 мм можно привести следующие: обработка радиаторов для микросхем, микросопел для двигателей микропутников, каналов в устройствах подачи лекарственных средств и др. На рисунке 1 представлены характерные области промышленного применения микрофрез.

Учитывая, что постобработка микрофрезерованных деталей чрезвычайно сложна, микрофрезерование в большинстве случаев является заключительным этапом производственной цепочки и поэтому к качеству обработанных поверхностей предъявляются высокие требования.

Твердосплавные микрофрезы являются дорогостоящим режущим инструментом и поэтому вопросы повышения их износостойкости чрезвычайно актуальны. Для

повышения износостойкости микрофрез на практике используются различные технологии модификации поверхности и нанесения износостойких покрытий. Их применение позволяет увеличить срок службы микрофрез, но при этом значительно увеличивается радиус скругления режущих кромок, что для микроинструмента негативно сказывается на условиях стружкообразования, увеличивает силовые нагрузки на режущий инструмент и ухудшает состояние поверхности обработанной детали.

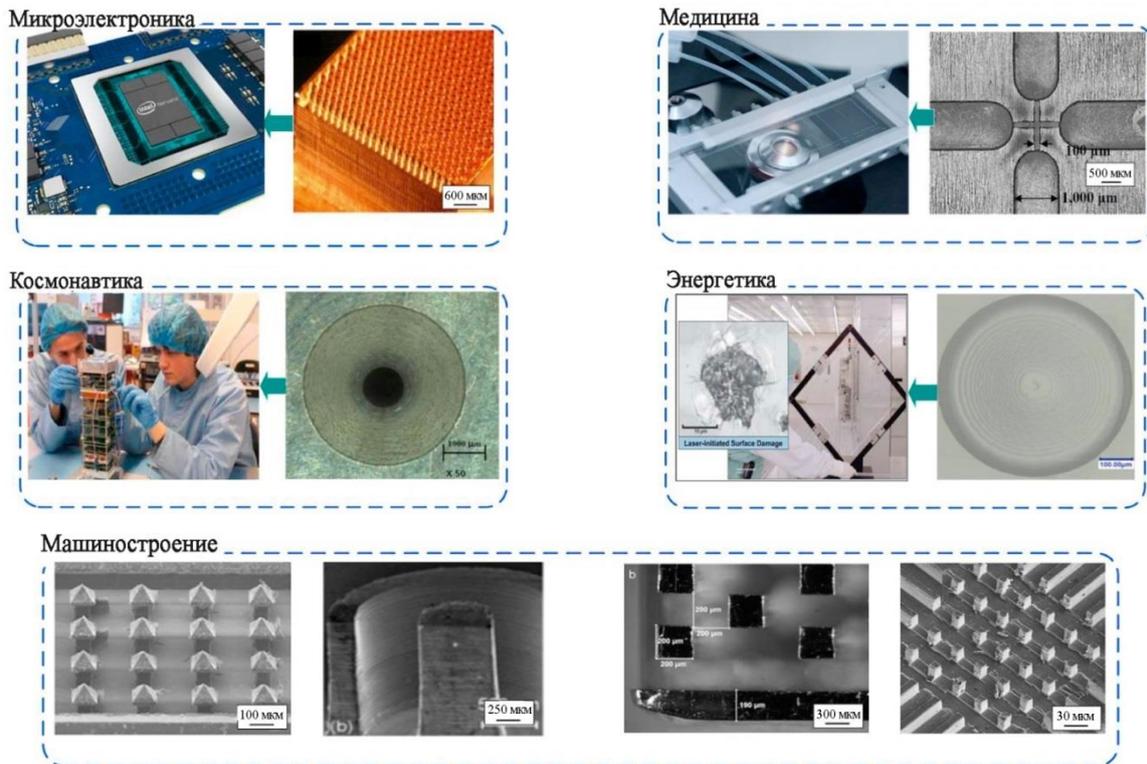
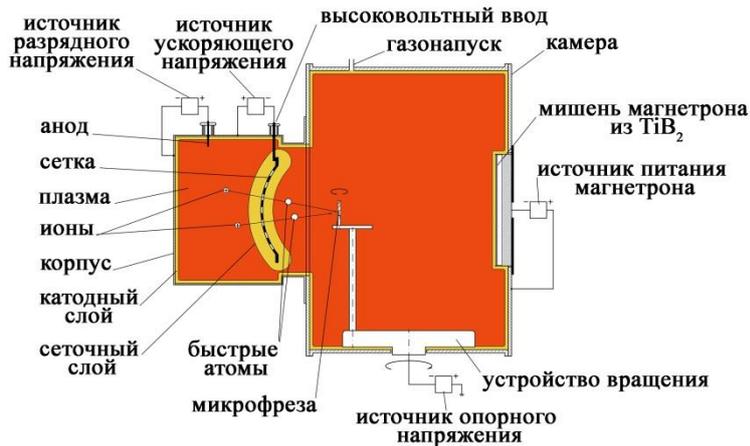


Рисунок 1 – Примеры применения концевых микрофрез в промышленности

**Во второй главе** изложены принципы комплексной плазменно-пучковой модификации твердосплавных концевых микрофрез.

Для разработки и исследования принципов заострения режущих кромок инструмента пучком быстрых атомов было усовершенствовано вакуумно-плазменное оборудование, общий вид которого представлен на рисунке 2. Вогнутая сетка диаметром 200 мм с радиусом кривизны поверхности 200 мм прикреплена к высоковольтному вводу, подключенному к источнику ускоряющего напряжения. На поверхности сетки равномерно распределены отверстия диаметром 7 мм на расстоянии 8 мм между их центрами. Пучок быстрых атомов генерировался сеткой, погруженной в аргоновую плазму, и имеющую потенциал  $-5000$  В по отношению к камере. Сетка удалена на 220 мм от оси вращающегося держателя с обрабатываемым инструментом.



а)



б)

Рисунок 2 – Схема формирования пучка быстрых нейтральных атомов при заточке микрофрез (а) и общий вид (фото с двух ракурсов) вакуумно-плазменного оборудования (б) для комплексной плазменно-пучковой модификации твердосплавных концевых микрофрез

Для проверки возможности заточки режущих кромок пучком быстрых атомов на начальном этапе исследований использовались трехзубые концевые фрезы диаметром 3 мм из твердого сплава (WC – 94 %; Co – 6 %) с размером зерен 0,5 – 0,8 мкм.

При изучении влияния бомбардировки пучком быстрых атомов аргона на изменение радиуса скругления режущих кромок сравнивали исходные геометрические параметры концевых фрез с параметрами, достигаемыми после обработки. Радиус режущей кромки измерялся на каждом зубе фрезы, путем усреднения его значения в четырех сечениях отстоящих друг от друга на расстоянии 50 мкм. Значения радиусов скругления режущих кромок концевых фрез до и после обработки пучком быстрых атомов представлены на рисунке 3.

Для исходных фрез среднее значение радиуса скругления режущих кромок на расстоянии 2 мм от торца составило 10,8 мкм, на расстоянии 7 мм – 10,5 мкм и на расстоянии 12 мм – 10,25 мкм. После обработки пучком быстрых атомов среднее значение радиуса на расстоянии 2 мм от торца составило 4,25 мкм, на расстоянии 7 мм – 3,65 мкм и на расстоянии 12 мм – 4,1 мкм.

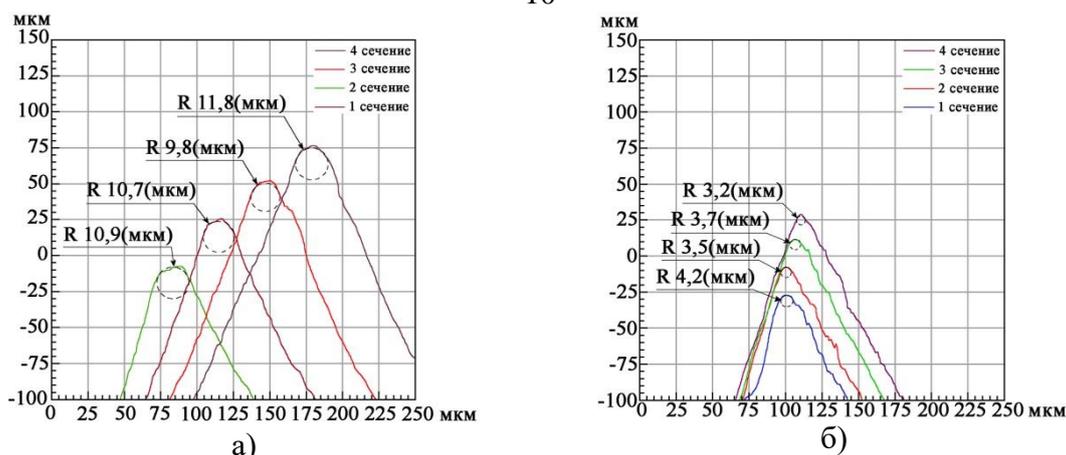


Рисунок 3 – Радиусы скругления режущих кромок концевых фрез диаметром 3 мм в четырех сечениях до обработки пучком быстрыми атомами аргона (а) и после обработки (б)

Влияние времени обработки концевых фрез пучком быстрых атомов на радиус скругления режущих кромок представлено в таблице 1. Результаты измерений показывают, что минимальный радиус достигается при обработке в течение 3-х часов.

Таблица 1 – Влияние времени обработки концевых фрез диаметром 3 мм пучком быстрых атомов аргона на радиус скругления режущих кромок

Время обработки, ч	Участки, удаленные от конца фрезы, мм		
	2	7	12
Радиус режущей кромки, мкм			
до обработки	10,8	10,5	10,25
1,5	6,8	6,0	6,4
3	4,25	3,65	4,1
4,5	4,55	3,7	4,4

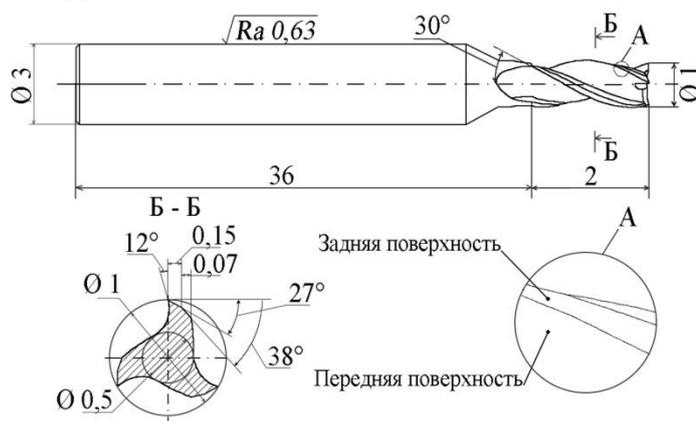
Результаты экспериментальных исследований показывают, что обработка концевых фрез пучком быстрых атомов позволяет осуществлять их заточку – радиус скругления режущих кромок с 10–11 мкм, достигаемый традиционным шлифованием, уменьшается до 3–4 мкм.

В дальнейших исследованиях в качестве объектов использовались концевые микрофрезы производства компании Iscar диаметром 1 мм, длиной рабочей части 2 мм и углом наклона стружечной канавки 30 градусов (рисунок 4). Материалом концевых фрез является твердый сплав (WC – 80 %; Co – 20 %) с размером зерен 0,3–0,8 мкм.

Комплексная плазменно-пучковая модификация твердосплавных микрофрез включала последовательное выполнение следующих этапов: 1 – заострение режущих кромок пучком быстрых атомов аргона; 2 – нанесение износостойких покрытий TiV<sub>2</sub> магнетронным методом. Комплексная модификация микрофрез выполнялась на оборудовании, общий вид которого приведен на рисунке 2.



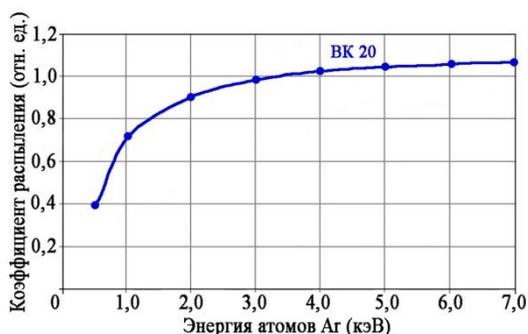
а)



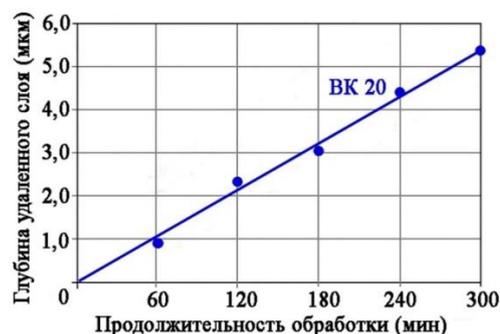
б)

Рисунок 4 – Общий вид концевой микрофрезы диаметром 1 мм (а) и ее чертеж с геометрическими параметрами (б)

Среди режимов обработки пучком быстрых атомов ключевое значение имеют энергия бомбардирующих поверхность атомов, и продолжительность обработки. На основе данных экспериментальных исследований была построена зависимость коэффициента распыления используемого твердого сплава от энергии бомбардирующих поверхность атомов Ar (рисунок 5, а).



а)



б)

Рисунок 5 – Зависимости коэффициента распыления твердого сплава от энергии атомов аргона, бомбардирующих поверхность (а) и глубины удаленного слоя от продолжительности обработки (б)

Коэффициент распыления твердого сплава резко возрастает при увеличении энергии частиц до значения  $\sim 5$  кэВ, а при дальнейшем увеличении энергии рост коэффициента замедляется, что, судя по всему, связано с возрастанием энергетических потерь на нагрев обрабатываемых твердосплавных образцов.

Установлено (рисунок 5, б), что зависимость глубины травления пучком быстрых атомов аргона от времени обработки для твердого сплава носит линейный характер, а скорость травления составляет 1,0 мкм/ч.

В результате применения предложенного подхода при обработке твердого сплава в течение 3 часов пучком быстрых атомов аргона с энергией 5 кэВ обеспечивается заточка режущих кромок. После заточки осуществлялся процесс

нанесения на их рабочие поверхности износостойких покрытий из  $TiB_2$  толщиной 3 мкм. Выбор указанного покрытия обусловлен его термической стабильностью и высокой микротвердостью, хорошими антифрикционными свойствами при обработке цветных металлов и жаропрочных сплавов.

На рисунке 6 представлена блок-схема технологического процесса и последовательность операций комплексной плазменно-пучковой модификации микрофрез.

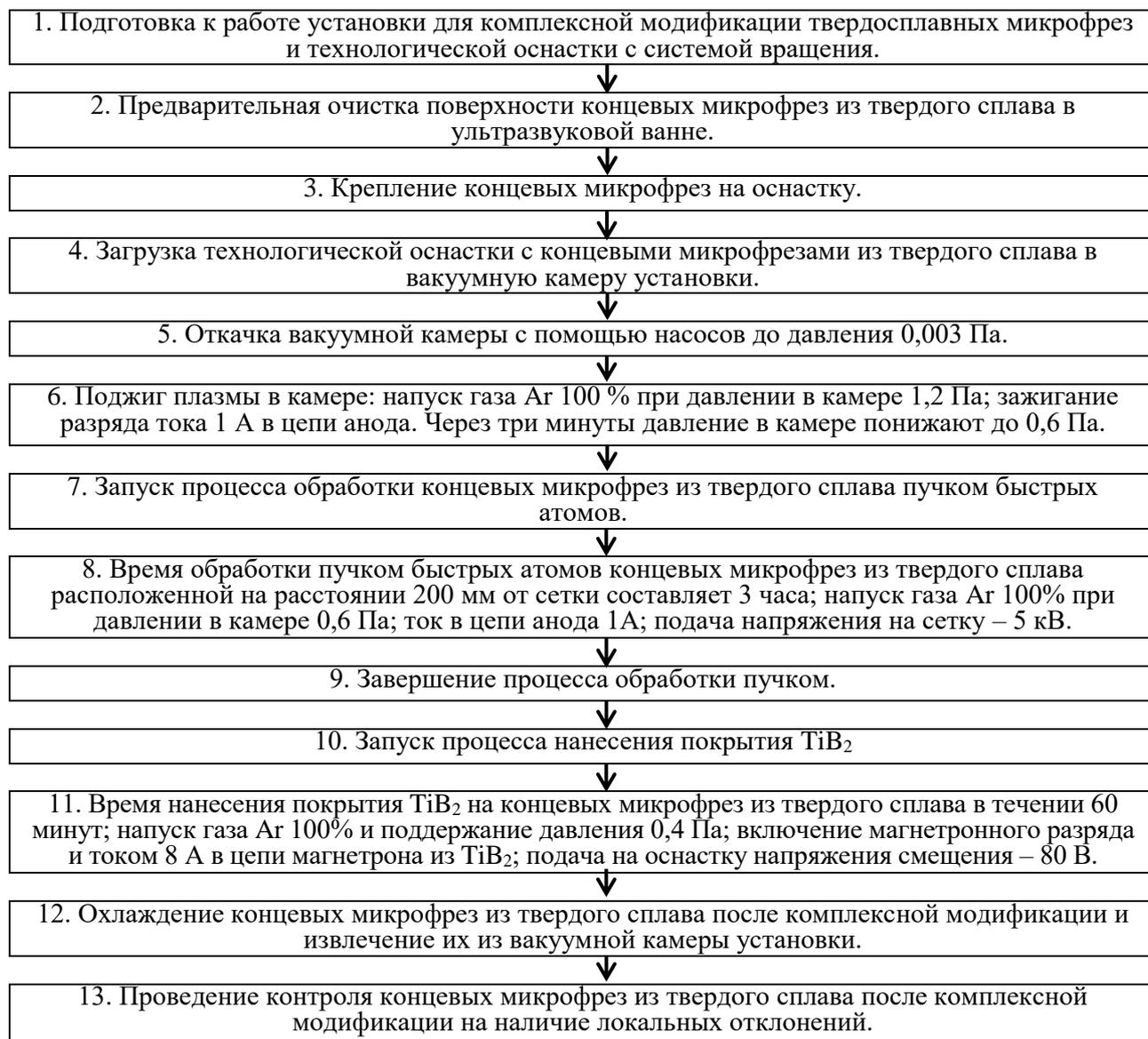


Рисунок 6 – Блок-схема технологического процесса комплексной плазменно-пучковой модификации микрофрез

Для оценки влияния комплексной модификации на изменение радиуса скругления режущих кромок микрофрез были проведены измерения трех вариантов инструмента: исходных (без модификации); после обработки пучком быстрых атомов; после заточки и нанесения покрытия. СЭМ-изображения режущих кромок приведены на рисунке 7.

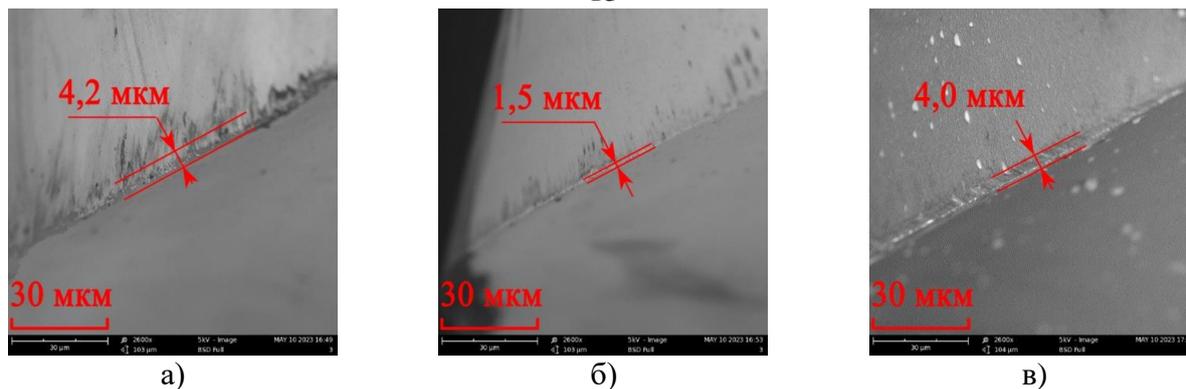
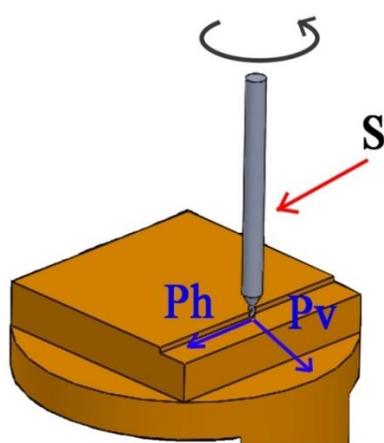


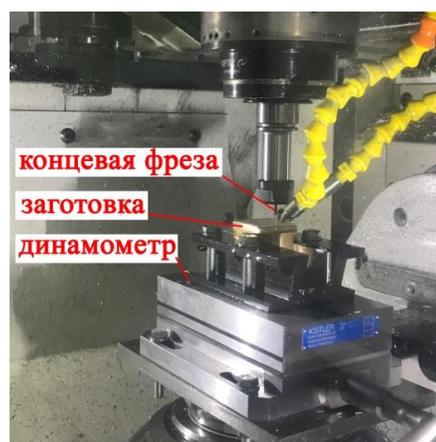
Рисунок 7 – СЭМ-изображения режущих кромок различных микрофрез: без модификации (а); после обработки пучком быстрых атомов (б); после комплексной плазменно-пучковой модификации (в)

Таким образом, радиус скругления режущих кромок микрофрез, подвергнутых комплексной модификации, составил  $\sim 4,0$  мкм, что сопоставимо с исходным радиусом скругления режущих кромок инструмента.

В третьей главе представлены результаты исследования силовых параметров при фрезеровании концевыми микрофрезами. Исследования осуществлялись с помощью методики расчета мгновенных значений осевой  $P_{z_i}$  и радиальной  $P_{y_i}$  составляющих силы резания при встречном фрезеровании по измеренным силовым параметрам  $P_{v_i}$  и  $P_{h_i}$ , где  $P_{v_i}$  – сила нормальная к направлению вектора подачи, а  $P_{h_i}$  – сила, действующая по направлению подачи (рисунок 8). Испытания проводились на 5-осевом вертикально-фрезерном обрабатывающем центре Mikron HSM 200U LP компании Georg Fischer (рисунок 8).



а)



б)

Рисунок 8 – Схема встречного микрофрезерования уступа детали из латуни Л80 (а); зона обработки при испытаниях на вертикальном фрезерном обрабатывающем центре Mikron HSM 200U LP (б)

Для исследования составляющих силы резания был выбран однофакторный многоуровневый план эксперимента (таблица 2), так как фрезерование наиболее

Таблица 2 – План экспериментов при исследовании силовых параметров в процессе микрофрезерования

Вариант микрофрезы	№ опыта	B, мм	S <sub>мин</sub> , мм/мин	t, мм	V, м/мин
Исходная	1	0,3	600	0,5	56,5
Исходная	2	0,6	600	0,5	56,5
Исходная	3	0,9	600	0,5	56,5
Исходная	4	0,6	300	0,5	56,5
Исходная	5	0,6	900	0,5	56,5
Исходная	6	0,6	1000	0,5	100
С покрытием TiB <sub>2</sub>	7	0,6	600	0,5	56,5
После заточки пучком быстрых атомов Ar	8	0,6	600	0,5	56,5
После комплексной плазменно-пучковой модификации	9	0,6	600	0,5	56,5

сложный вид резания, характеризующийся переменными величинами срезаемого слоя за один рабочий ход зуба фрезы при назначаемых постоянных факторах процесса резания. Были получены осциллограммы мгновенных значений силовых параметров  $P_{hi}$ ,  $P_{vi}$ , и  $P_{oi}$  масштабированные относительно угла поворота зуба фрезы  $\psi$  в течение всего периода его рабочего хода.

Расчет значений основных составляющих силы резания  $P_{zi}$ ,  $P_{yi}$ ,  $P_{oi}$ , возникающих на зубе фрезы в каждый момент резания в зависимости от факторов фрезерования можно описать с помощью принятых моделей следующего типа:

$$P_{zi} = C_{Pz} \cdot B_{\psi i}^{x_{Pz}} \cdot \alpha_{\xi i}^{y_{Pz}} \cdot V^{z_{Pz}} \cdot K_{Pz} \quad (1)$$

$$P_{yi} = C_{Py} \cdot B_{\psi i}^{x_{Py}} \cdot \alpha_{\xi i}^{y_{Py}} \cdot V^{z_{Py}} \cdot K_{Py} \quad (2)$$

$$P_{oi} = C_{Po} \cdot B_{\psi i}^{x_{Po}} \cdot \alpha_{\xi i}^{y_{Po}} \cdot V^{z_{Po}} \cdot K_{Po} \quad (3)$$

В данных моделях  $C_{Pz}$ ,  $C_{Py}$ ,  $C_{Po}$  – постоянные коэффициенты;  $K_{Pz}$ ,  $K_{Py}$ ,  $K_{Po}$ , – поправочные коэффициенты, которые могут учитывать состояние острозаточенного инструмента, например, покрытие, воздействие пучком быстрых атомов аргона, а также комплексную модификацию;  $X_{Pz}$ ,  $X_{Py}$ ,  $X_{Po}$ ,  $Y_{Pz}$ ,  $Y_{Py}$ ,  $Y_{Po}$ , и т.д. – степени влияния факторов процесса резания на силовые параметры;  $B_{\psi i}$  – значение ширины фрезерования при повороте зуба фрезы на мгновенный угол  $\psi_i$ ;  $\alpha_{\xi i}$  – номинальное значение срезаемого слоя при повороте точки приложения результирующего вектора силы на мгновенный угол  $\xi_i$  определяется по формуле  $\alpha_{\xi i} = S_z \cdot \sin \xi_i$  (где  $S_z$  – подача на зуб фрезы);  $V$  – скорость фрезерования.

На рисунке 9 дана графическая интерпретация результатов расчета силовых параметров  $P_{zi}$  и  $P_{yi}$ . Визуальный анализ графиков показывает, что при всех сочетаниях факторов микрофрезерования не наблюдается значительных отклонений от формы изменения сил в зависимости от изменения толщины срезаемого слоя и ширины фрезерования при повороте зуба фрезы на угол  $\psi_B$  и угла  $\psi_t$ . Наибольшие значения силовые параметры  $P_z$  и  $P_y$  приобретают на каждом режиме при повороте фрезы на угол  $\psi \approx 90^\circ$ , где максимальной является ширина срезаемого слоя  $B$  с последующим её уменьшением.

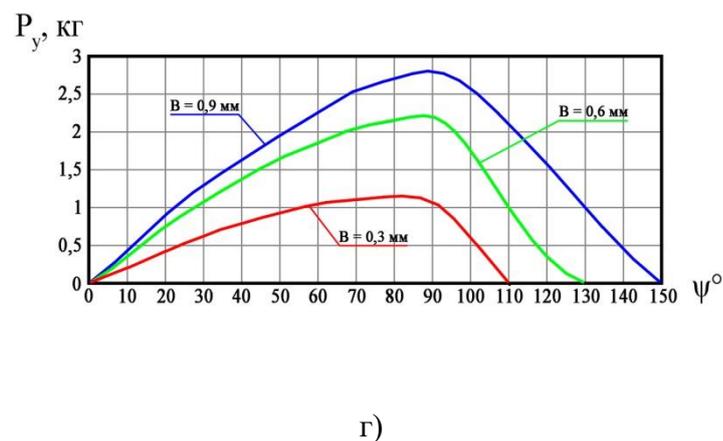
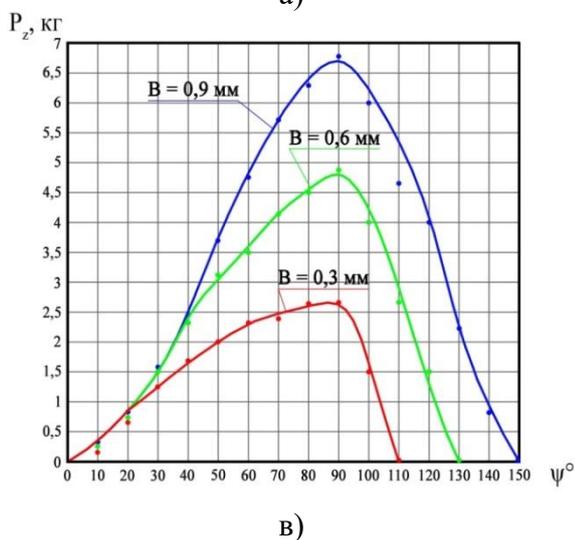
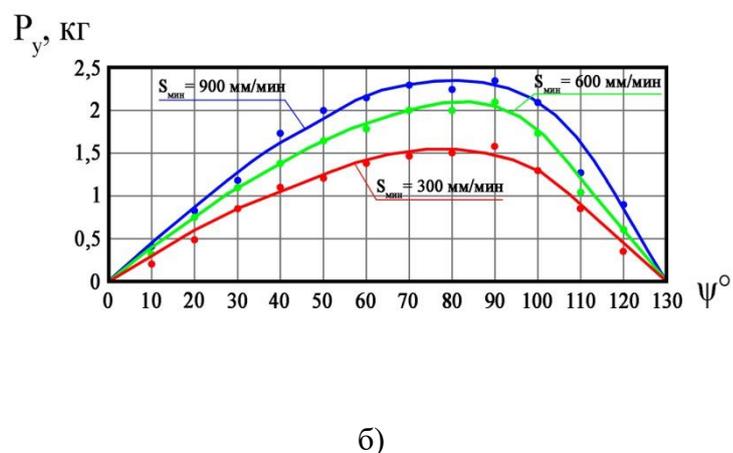
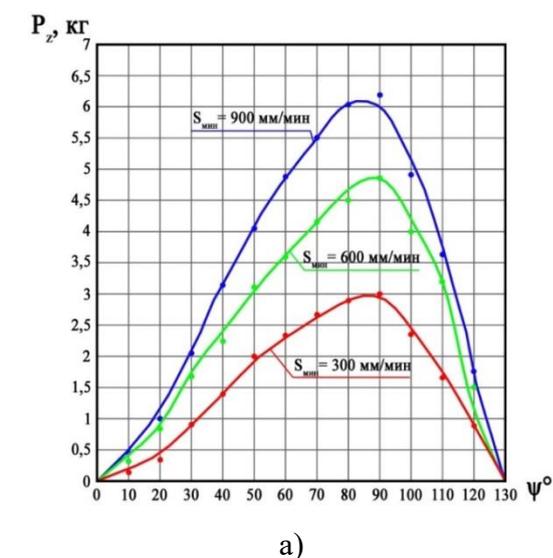


Рисунок 9 – Графики мгновенных значений составляющих силы резания  $P_z$  и  $P_y$ , возникающие на зубе фрезы при скорости фрезерования  $V = 56,5$  м/мин; при ширине фрезерования  $B = 0,6$  мм (а, б); при минутной подаче  $S_{мин} = 600$  мм/мин (в, г)

В таблицах 3, 4 и 5 приведены экспериментально полученные данные о влиянии изменения подачи  $S_{мин}$ , ширины срезаемого слоя  $B$  и скорости резания  $V$  на составляющие силы резания при микрофрезеровании.

Таблица 3 – Влияние изменения подачи  $S_{\text{мин}}$  на составляющие силы резания при микрофрезеровании

B, мм	V, м/мин	$S_{\text{мин}}$ , мм/мин	$\psi_i, ^\circ$	$\xi_i, ^\circ$	$\alpha_{\xi_i}$ , мм	Pzi, Н	Pyi, Н
0,6	56,5	300	40	20	0,002	14,5	11,0
		600			0,0034	23,5	14,1
		900			0,0064	31,5	16,9
		300	60	40	0,0034	23,2	14,0
		600			0,0064	35,6	18,2
		900			0,0087	49,2	20,9
		300	80	60	0,0052	29,1	14,8
		600			0,0087	45,1	20,1
		900			0,015	60,4	23,2

Таблица 4 – Влияние ширины срезаемого слоя B на составляющие силы резания при микрофрезеровании

B, мм	$\xi_i, ^\circ$	$\alpha_{\xi_i}$ , мм	$\psi_i, ^\circ$	Pzi, Н	Pyi, Н	Poi, Н
0,3	50	0,0084	60	23,5	11,5	9,4
0,6			70	41,1	20,0	18,8
0,9			80	63,0	26,0	26,3
0,3	60	0,0095	70	25,0	11,7	10,8
0,6			80	45,0	21,0	20,0
0,9			90	67,0	28,0	29,5

Таблица 5 – Влияние скорости резания V на составляющие силы резания при микрофрезеровании

V, м/мин	$\psi_i, ^\circ$	Pzi, Н	Pyi, Н	Poi, Н
56,5	40	22,6	14,1	10,0
	60	35,6	19,2	15,8
	90	49,2	21,9	21,0
100	40	22,1	13,8	9,5
	60	35,8	18,8	15,8
	90	49,6	22,3	20,0

Анализ полученных данных показывает, что наблюдаются отрицательные степени влияния скорости на некоторые составляющие силы резания, имеющие малые значения (не выше  $-0,03$ ), что можно отнести к погрешностям измерения силовых параметров. Поэтому степень влияния скорости резания V на рассматриваемые силовые параметры была принята равной 0.

Постоянные коэффициенты принимались как средние величины их частных значений в каждом опыте и рассчитывались по следующей формуле:

$$C_{Pz} = \frac{P_z}{B^{\alpha_{Pz}} \psi_i^{\alpha_{\psi_i}} \alpha_{\xi_i}^{\alpha_{\xi_i}}} \quad (4)$$

Были рассчитаны средние значения коэффициентов для каждой составляющей силы:  $C_{P_0} = 87$ ;  $C_{P_z} = 264$ ;  $C_{P_y} = 17,1$ .

В результате вычислений были получены следующие модели мгновенных значений окружной  $Pz_i$ , радиальной  $Pу_i$  и осевой  $Po_i$  составляющих силы резания при микрофрезеровании концевыми твердосплавными фрезами диаметром 1 мм в исходном состоянии (без модификации):

$$Pz_i = 264 \cdot V_{\psi i}^{0,89} \cdot \alpha_{\xi i}^{0,77} \quad (5)$$

$$Pу_i = 17,1 \cdot V_{\psi i}^{0,86} \cdot \alpha_{\xi i}^{0,36} \quad (6)$$

$$Po_i = 87 \cdot V_{\psi i}^{0,9} \cdot \alpha_{\xi i}^{0,71} \quad (7)$$

В таблице 6 приведены результаты измерения составляющих сил резания и расчетов поправочных коэффициентов для различных вариантов микрофрез.

Таблица 6 – Результаты измерения составляющих силы резания и расчета поправочных коэффициентов

Вариант микрофрезы	$\psi$ , °	$Pz$ , кг	$K_{Pz}$	$Pу$ , кг	$K_{Pу}$	$Po$ , кг	$K_{Po}$	$\psi$ , °	$Pz$ , кг	$K_{Pz}$	$Pу$ , кг	$K_{Pу}$	$Po$ , кг	$K_{Po}$
Исходная	40	2,26		1,41		1,00		60	3,56		1,82		1,58	
С покрытием $TiB_2$		2,61	1,16	1,00	0,68	1,08	1,1		4,16	1,17	1,43	0,79	1,78	1,13
После заточки пучком атомов Ar		1,83	0,81	1,1	0,78	0,81	0,81		2,9	0,82	1,35	0,74	1,30	0,82
После комплексной плазменно-пучковой модификации		2,28	1,01	1,16	0,79	0,88	0,88		3,46	0,97	1,47	0,81	1,56	0,98

Для оценки силовых параметров, возникающих при обработке различными вариантами микрофрез (с покрытием  $TiB_2$ , после заточки пучком быстрых атомов Ar, после комплексной модификации) были найдены средние значения поправочных коэффициентов:

$$K_{Pz(TiB_2)} = 1,17; K_{Pz(заточка Ar)} = 0,82; K_{Pz(компл.модиф)} = 0,99$$

$$K_{Pу(TiB_2)} = 0,74; K_{Pу(заточка Ar)} = 0,76; K_{Pу(компл.модиф)} = 0,8$$

$$K_{Po(TiB_2)} = 1,12; K_{Po(заточка Ar)} = 0,81; K_{Po(компл.модиф)} = 0,93$$

Результаты выполненных расчетов показывают, что построенные модели адекватно отображают значения силовых параметров при изменении условий микрофрезерования (погрешность не превышает  $\pm 5\%$ ).

В четвертой главе представлены результаты стойкостных испытаний различных вариантов концевых микрофрез.

Стойкостные испытания концевых твердосплавных микрофрез проводили на сверлильно-фрезерном станке с ЧПУ «Bungard CCD/ATC» компании Bungard при обработке пазов для подачи жидкости охлаждения деталей из латуни Л80.

Эксперименты проводились при частоте вращения шпинделя 50 000 об/мин (скорости резания 157 м/мин), глубине резания 100 мкм и подачи 150 мм/мин.

Для оценки эффективности технологии комплексной плазменно-пучковой модификации микрофрез сравнивали шероховатость поверхности пазов, величину формируемого заусенца и время резания до отказа (стойкость).

Трехмерные профилограммы поверхности пазов, обработанных различными вариантами микрофрез, представлены на рисунке 10. Соответствующие значения шероховатости поверхности по параметрам Ra и Rz приведены на рисунке 11. На рисунке 12 приведены оптические изображения заусенцев над канавкой после фрезерования различными микрофрезами. Результаты сравнительных стойкостных испытаний различных микрофрез показаны на рисунке 13.

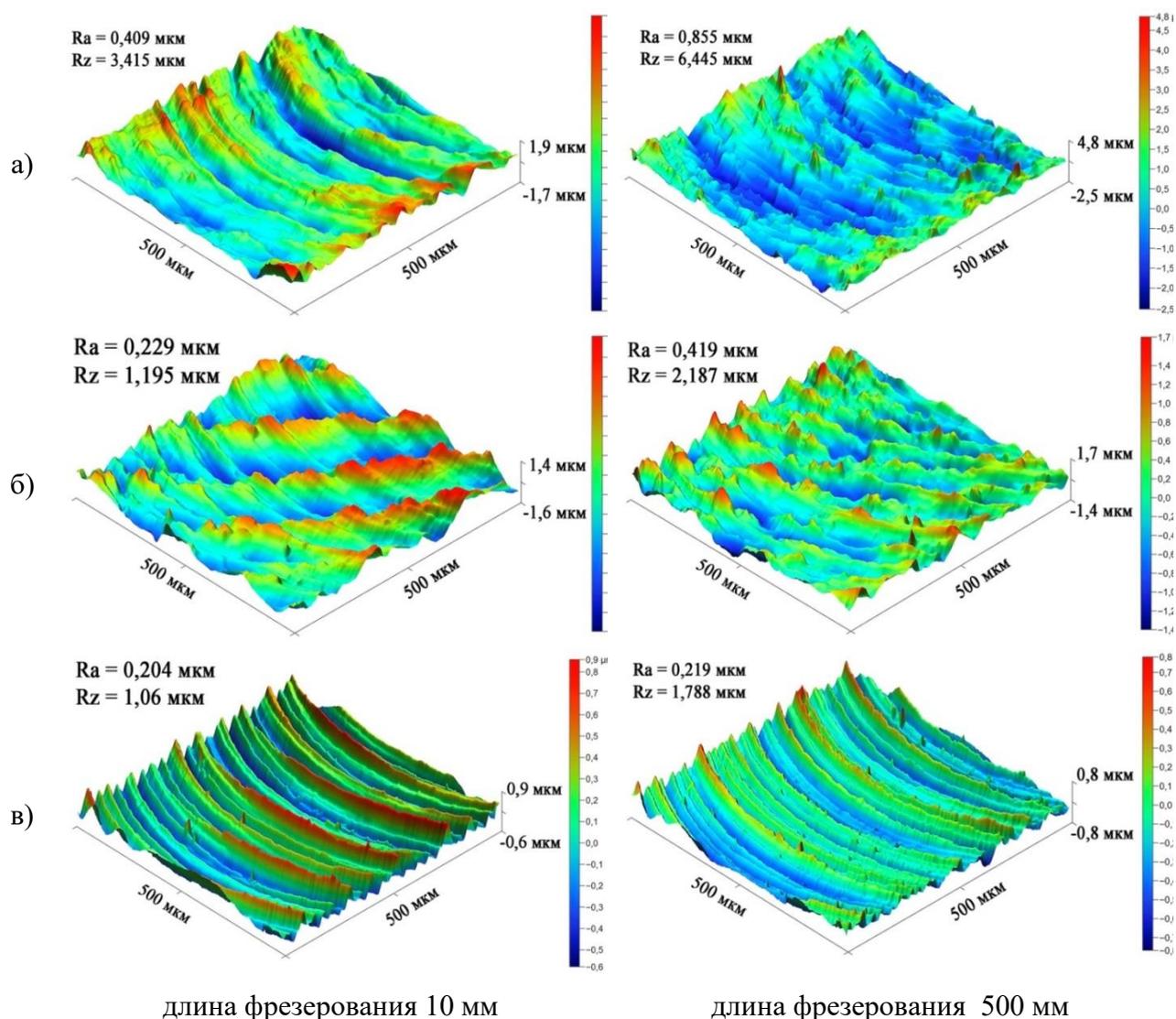


Рисунок 10 – Трехмерные профилограммы поверхности канавок после фрезерования различными микрофрезами: без обработки (а); с покрытием из TiB2 (б); после комплексной модификации (в)

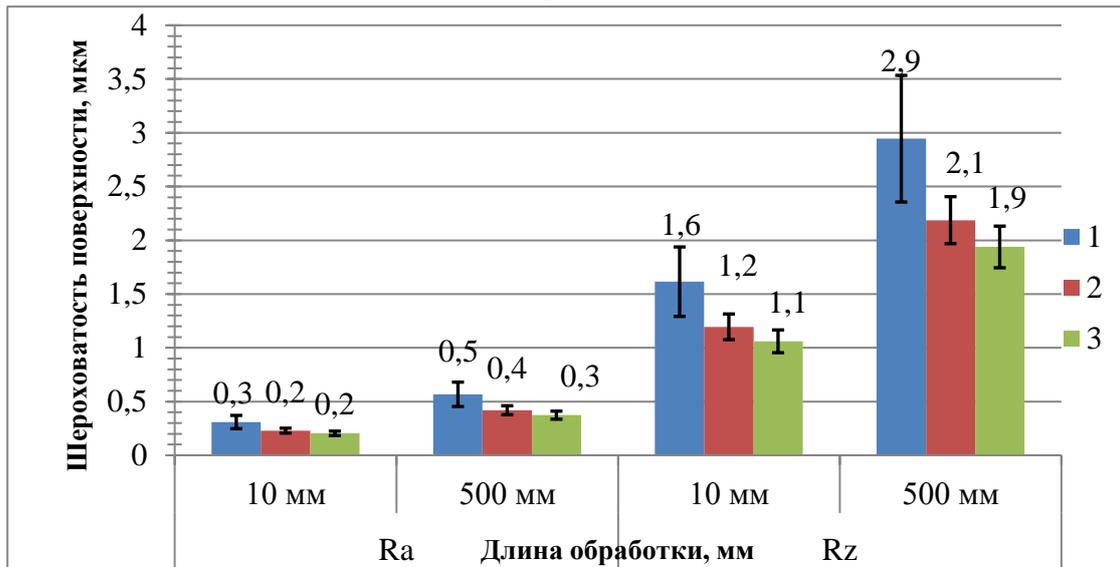


Рисунок 11 – Диаграмма шероховатости поверхности канавок после фрезерования различными вариантами микрофрез: 1 – без обработки; 2 – с покрытием из TiB<sub>2</sub>; 3 – после комплексной модификации

Сравнение шероховатости поверхности канавок, обработанных различными микрофрезами, свидетельствует об эффективности разработанной технологии комплексной модификации по отношению к микрофрезам исходным и с покрытием TiB<sub>2</sub> (см. рисунки 10 и 11). При увеличении пути резания (увеличении износа) микрофрезы после комплексной модификации обеспечивают шероховатость обработанной поверхности меньшую по сравнению с другими.

Из-за заострения режущей кромки размеры заусенцев, формируемых на поверхности паза, для микрофрез после комплексной модификации были значительно ниже, что является важным показателем качества обработки (рисунок 12).

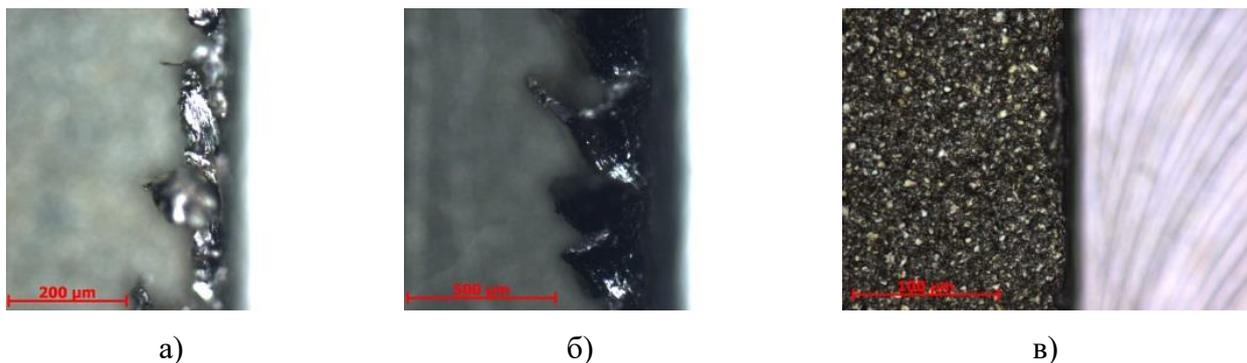


Рисунок 12 – Оптические изображения заусенцев над канавкой после фрезерования различными микрофрезами: без обработки (а); с покрытием из TiB<sub>2</sub> (б); после комплексной модификации (в)

Результаты стойкостных испытаний концевых микрофрез показали, что предлагаемая технология комплексной плазменно-пучковой модификации более чем в 2,6 раза увеличивает стойкость инструмента по сравнению с исходными микрофрезами (рисунок 13).

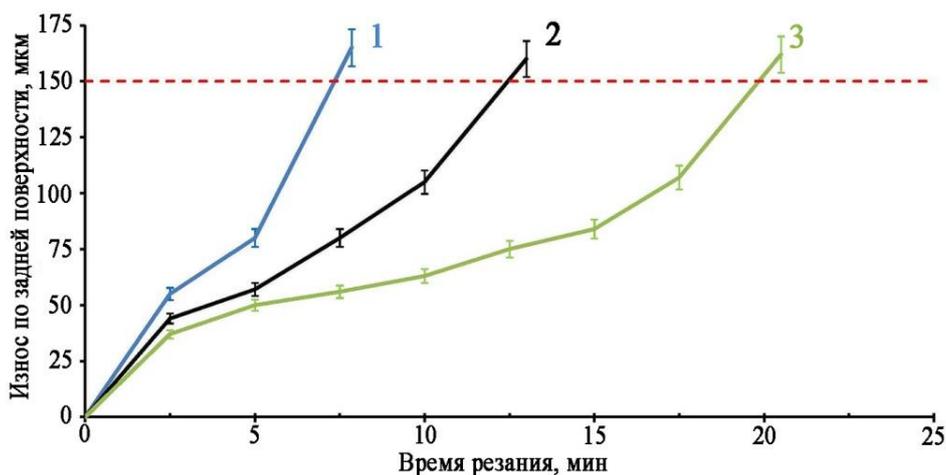


Рисунок 13 – Зависимости износа по задней поверхности различных микрофрез при фрезеровании канавок в детали из латуни Л80: 1 – без обработки; 2 – с покрытием из  $TiB_2$ ; 3 – после комплексной модификации

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В диссертационной работе изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения в области проблемы повышения эксплуатационных показателей дорогостоящих концевых твердосплавных микрофрез (диаметром не более 1 мм). На основе разработки, реализации и исследования комплексной плазменно-пучковой модификации поверхностного слоя микроинструмента.

2. На основе анализа процессов распыления поверхности микроинструментов в вакуумной камере с использованием источника пучков быстрых атомов аргона, генерируемых тлеющим разрядом низкого давления, исследованы технологические возможности их применения для заострения режущих кромок концевых твердосплавных микрофрез, при этом обеспечивается для инструмента диаметром 1 мм снижение радиуса скругления с 4 мкм до 1 мкм.

3. Разработана и реализована технология комплексной плазменно-пучковой модификации концевых твердосплавных микрофрез, включающая обработку пучками быстрых атомов аргона с энергией 5 кэВ в течении 180 минут для заострения режущих кромок и последующее нанесение износостойких покрытий  $TiB_2$  толщиной 3 мкм методом магнетронного распыления, позволившая улучшить эксплуатационные показатели микроинструмента (стойкость инструмента и качество обработанных канавок в деталях из латуни).

4. Произведено усовершенствование вакуумно-плазменного оборудования и разработаны технические решения, позволившие в едином технологическом цикле выполнять комплексную плазменно-пучковую модификацию поверхностного слоя твердосплавных микрофрез, включающую заострение режущих кромок пучками

быстрых атомов аргона со скоростью травления  $\sim 1,0$  мкм/ч и нанесение вакуумно-плазменных износостойких покрытий  $TiB_2$  со скоростью осаждения  $\sim 3,0$  мкм/ч.

5. Разработанные модели для расчета силовых параметров при фрезеровании концевыми твердосплавными микрофрезами деталей из латуни, учитывающие влияние факторов, связанных с размером радиуса скругления режущих кромок инструмента и режимами резания, адекватно отображают значения составляющих силы резания (отличие расчетных и экспериментальных данных не превышает  $\pm 5\%$ ). Установлено, что при резании микрофрезами диаметром 1 мм после комплексной модификации составляющая силы  $P_z$  эквивалентна значению при резании исходными микрофрезами, а составляющая силы  $P_y$  снижается на 25 %, что связано с уменьшением коэффициента трения на контактных поверхностях микрофрез после заострения режущих кромок и нанесения покрытий  $TiB_2$ .

6. Выполненные стойкостные испытания при обработке канавок в деталях из латуни показали, что применение комплексной плазменно-пучковой модификации поверхностного слоя микрофрез повышает их стойкость в 2 раза, обеспечивает снижение шероховатости обработанной поверхности и размеров формируемых заусенцев в сравнении с исходными микрофрезами.

### СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Grigoriev, S.N. Micro End Mill Capability Improvement Due to Processing by Fast Argon Atoms and Deposition of Wear-Resistant Coating / S.N. Grigoriev, A. Metel, **E. Mustafaev**, Y. Melnik, M. Volosova // *Metals*. – 2023. – Vol. 13, No. 8. – P. 1404.
2. Metel, A.S. Removal of Wear-Resistant Coatings from Cutting Tools by Fast Argon Atoms / A.S. Metel, M.A. Volosova, Y.A. Melnik, S.N. Grigoriev, **E.S. Mustafaev** // *Coatings*. – 2023. – Vol. 13, No. 6. – P. 999.
3. Grigoriev, S. Specific features of the structure and properties of arc-PVD coatings depending on the spatial arrangement of the sample in the chamber / S. Grigoriev, **E. Mustafaev**, A. Vereschaka, V. Zelenkov, N. Sitnikov, J. Bublikov, F. Milovich, N. Andreev // *Vacuum*. – 2022. – Vol. 200. – P. 111047.
4. Metel, A.S. Compression of a Beam of Fast Argon Atoms for Surface Polishing / A.S. Metel, S.N. Grigoriev, M.A. Volosova, Y.A. Melnik, **E.S. Mustafaev** // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2022. – Vol. 65, No. 6. – P. 910-917.
5. Metel, A. Plasma-Beam Processing of Tools Made of SiAlON Dielectric Ceramics to Increase Wear Resistance When Cutting Nickel–Chromium Alloys / A. Metel, M. Volosova, **E. Mustafaev**, Y. Melnik, A. Seleznev // *Coatings*. – 2022. – Vol. 12, No. 4.
6. Grigoriev, S.N. Combined Treatment of Parts Produced by Additive Manufacturing Methods for Improving the Surface Quality / S.N. Grigoriev, A.S. Metel, M.A. Volosova, Y. Melnik, **E. Mustafaev** // *Technologies*. – 2022. – Vol. 10, No. 6. – P. 130.

7. Fedorov, S.V. Milling of electron beam melting Ti-6Al-4V by HSS instrument with combined surface treatment / S.V. Fedorov, T. Oo, **E.S. Mustafaev** // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1037 MSF. – P. 245-250.
8. Metel, A. Combined processing of micro cutters using a beam of fast argon atoms in plasma / A. Metel, Y. Melnik, **E. Mustafaev**, I. Minin, P. Pivkin // Coatings. – 2021. – Vol. 11, No. 4.
9. Metel, A. Synthesis of aluminum nitride coatings assisted by fast argon atoms in a magnetron sputtering system with a separate input of argon and nitrogen / A. Metel, S. Grigoriev, M. Volosova, Y. Melnik, **E. Mustafaev** // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 398. – P. 126078.
10. Metel, A. Surface hardening of machine parts using nitriding and TiN coating deposition in glow discharge / A. Metel, S. Grigoriev, Y. Melnik, M. Volosova, **E. Mustafaev** // Machines. – 2020. – Vol. 8, No. 3. – P. 42.
11. Fedorov, S.V. The formation of the cutting tool microgeometry by pulsed laser ablation / S.V. Fedorov, E.A. Ostrikov, **E.S. Mustafaev**, K. Hamdy // Mechanics and Industry. – 2019. – Vol. 19, No. 7. – P. 703.
12. Grigoriev, S. Surface Hardening of Massive Steel Products in the Low-pressure Glow Discharge Plasma / S.N. Grigoriev, A. Metel, M. Volosova, Y. Melnik, H. Ney, **E. Mustafaev** // Technologies. – 2019. – Vol. 7(3). – P. 62.
13. Григорьев, С.Н. Отладка режимов процесса электроэрозионной обработки с помощью анализа виброакустических сигналов / С.Н. Григорьев, М.П. Козочкин, А.Н. Порватов, **Э.С. Мустафаев** // Контроль. Диагностика. – 2022. – Т. 25, № 11(293). – С. 20-30.
14. Метель, А.С. Компрессия пучка быстрых атомов аргона для полирования поверхности / А.С. Метель, С.Н. Григорьев, М.А. Волосова, Ю.А. Мельник, **Э.С. Мустафаев** // Приборы и техника эксперимента. – 2022. – № 6. – С. 53-60.
15. Метель, А.С. Нагрев инструмента пучком быстрых атомов, формируемым погруженной в плазму сеткой / А.С. Метель, **Э.С. Мустафаев**, Х.А. Нэй // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2019. – № 4(51). – С. 38-40.
16. Метель, А.С. Метод упрочнения инструмента покрытием из нитрида титана, синтезируемым при испарении титана в тигле-аноде тлеющего разряда / Ю.А. Мельник, А.С. Метель, **Э.С. Мустафаев**, Х.А. Нэй // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2018. – № 4(47). – С. 94-98.
17. Metel, A. Generation of Electron and Fast Atom Beams by a Grid Immersed in Plasma / A. Metel, Y. Melnik, K. Hamdy, **E. Mustafaev** // V International Conference «Modeling of Nonlinear Processes and Systems» (MNPS-2020) EPJ Web Conf. – 2020. – Vol. –248.

18. Grigoriev, S.N. Si-containing diamond-like carbon coatings to improve the wear resistance of solid ceramic end mills / S.N. Grigoriev, M.A. Volosova, S.V. Fyodorov, **E.S. Mustafaev** // 15th International Conference on Films and Coatings (ICFC 2021) 18-20 May 2021, Saint Petersburg, Russia J. Phys.: Conf. Ser. –2021. – Vol. –1954.

19. Метель, А.С. Улучшение трибологических характеристик поверхности полированием пучком быстрых атомов аргона / А.С. Метель, Ю.А. Мельник, **Э.С. Мустафаев** // XIV Международная научно-техническая конференция «Трибология – машиностроению 2022», Москва, Россия. – 12-14 октября 2022. – С. 211-214.

20. Metel, A.S. Precision processing of microtools with beams of fast atoms obtained in plasma by accelerating its ions and their charge exchange collisions / A.S. Metel, Y.A. Melnik, **E.S. Mustafaev** //16th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows (EFRE-2022), Томск, Россия. – 2-8 октября 2022. – P. 237

По результатам исследований получены 6 патентов Российской Федерации на изобретения:

1. Патент № 2794524 С1 Российская Федерация, МПК H01J 27/04, H01J 37/36, C23C 14/36. Магнетронное распылительное устройство: № 2022126811: заявл. 14.10.2022: опубл. 20.04.2023 / А.С. Метель, С.Н. Григорьев, М.А. Волосова, Ю.А. Мельник, **Э.С. Мустафаев**, Х.А. Нэй; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»).

2. Патент № 2797697 С1 Российская Федерация, МПК H01J 27/04. Распылительное устройство: № 2022126812: заявл. 14.10.2022: опубл. 07.06.2023 / А.С. Метель, С.Н. Григорьев, М.А. Волосова, Ю.А. Мельник, **Э.С. Мустафаев**, Х.А. Нэй; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН».

3. Патент № 2778246 С1 Российская Федерация, МПК H01J 27/04. Устройство для обработки изделий быстрыми атомами: № 2021135435: заявл. 02.12.2021: опубл. 16.08.2022 / А.С. Метель, С.Н. Григорьев, М.А. Волосова, Ю.А. Мельник, **Э.С. Мустафаев**; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН».

4. Патент № 2752877 С1 Российская Федерация, МПК H01J 37/34, H01J 27/04, H05H 3/00. Устройство для обработки диэлектрических изделий быстрыми атомами: № 2020140917: заявл. 11.12.2020: опубл. 11.08.2021 / С.Н. Григорьев, А.С. Метель,

М.А. Волосова, Ю.А. Мельник, **Э.С. Мустафаев**; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН».

5. Патент № 2726187 С1 Российская Федерация, МПК H01J 27/04, H01J 37/34, C23C 14/35. Устройство для обработки изделий быстрыми атомами: № 2019138589: заявл. 28.11.2019 : опубл. 09.07.2020 / А.С. Метель, С.Н. Григорьев, М.А. Волосова, Ю.А. Мельник, **Э.С. Мустафаев**; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (ФГБОУ ВО «СТАНКИН»).

6. Патент № 2726223 С1 Российская Федерация, МПК H01J 27/04, C23C 14/35. Магнетронное распылительное устройство: № 2019138588: заявл. 28.11.2019 : опубл. 10.07.2020 / С.Н. Григорьев, А.С. Метель, М.А. Волосова, Ю.А. Мельник, **Э.С. Мустафаев**; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»).

Научное издание

**Мустафаев Энвер Серверович**

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОНЦЕВЫХ  
ТВЕРДОСПЛАВНЫХ МИКРОФРЕЗ ЗА СЧЕТ ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОЙ  
МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ

*Автореферат диссертации*

*на соискание ученой степени кандидата технических наук*