

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по инновационной  
деятельности ФГБОУ ВО «УУНиТ»  
к.т.н., доцент

Г.К. Агеев

«11» декабря 2023 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Мустафаева Энвера Серверовича на тему «Повышение эксплуатационных показателей концевых твердосплавных микрофрез за счет плазменно-пучковой модификации поверхности», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности

2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)

### Актуальность темы диссертации

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. Именно решению актуальной задачи исследования и разработки новых методов модификации поверхности микроинструментов, обеспечивающих повышение эксплуатационных микрофрез, посвящена представленная к защите диссертация.

## Структура и содержание диссертации

Диссертация содержит 134 страницы машинописного текста, в том числе 63 рисунка, 20 таблиц и список литературы из 190 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы, обозначены цель работы, научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

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 микроспутников, 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.

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.

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.

Установлено, 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. Представлена блок-схема технологического процесса и последовательность операций комплексной плазменно-пучковой модификации микрофрез.

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

**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). 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.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

### **Теоретическая значимость**

**Цель работы** сформулирована следующим образом: 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<sub>2</sub>.

Поставленная цель была достигнута путем успешного решения следующих **задач**:

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<sub>2</sub>.

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** заключается в следующем:

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<sub>2</sub>), 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.

**Практическая значимость**

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<sub>2</sub>.

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

Степень достоверности полученных результатов подтверждается согласованием теоретических и экспериментальных исследований, а также результатами успешной апробации основных положений в рецензируемых научных изданиях и на международных и российских научных конференциях.

### **Апробация работы**

Логически завершённые разделы работы опубликованы в статьях, а также обсуждены на международных научно-технических конференциях. По теме диссертационной работы опубликованы 20 работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 12 статей в журналах, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web Science, 4 печатные работы доложены на российских и международных научно-технических конференциях. На технические решения, разработанные в рамках выполнения исследований, получены 6 патентов Российской Федерации на изобретения.

Детальное рассмотрение диссертационной работы позволяет выявить следующие **основные достоинства**:

1. Взаимосвязи радиуса режущих кромок твердосплавных концевых микрофрез и качества обработанной поверхности деталей из латуни.

2. Зависимости влияния факторов, связанных с размером радиуса скругления б режущих кромок концевых микрофрез и режимов резания (подача, скорость резания, глубина), на составляющие силы резания, возникающие при микрофрезеровании деталей из латуни.

3. 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<sub>2</sub>, обеспечивающих повышение эксплуатационных показателей инструмента.

Наряду с несомненными достоинствами в работе выявлены определенные **замечания**:

1. В тексте диссертации говорится, что ионы, проходя через ускоряющую сетку нейтрализуются и с энергией 5кэВ, распыляют поверхность инструмента.

Исходя из текста не понятен механизм нейтрализации ионов, проходящих через ускоряющую сетку.

2. Известно, что от температуры обрабатываемого изделия напрямую зависит качество наносимого покрытия и ее физико-механические и структурно-фазовые свойства. В тексте диссертации не приводится какая была температура при обработке ускоренными атомами аргона, а также при нанесении покрытия на основе  $TiB_2$ .

3. В тексте диссертации нет четкого определения процесса обработки, ускоренного атомами, во второй главе пишется, что это распыление и травление, в 3 и 4 главах – уже модификация поверхности. Если это модификация поверхности, хотелось бы уточнить глубину модифицирования.

4. Чем обоснован выбор энергии атомов аргонов 5кэВ, хотя по графику из рисунка 2.10 видно, что при энергии 4 и 6 кэВ относительный коэффициент распыления практически одинаковый и сильно не отличается.

5. Не до конца обоснован выбор покрытия инструмента  $TiB_2$ , хотя для обработки деталей из цветных металлов также используют  $ZrN$ ,  $CrN$  и DLC покрытия.

Сделанные замечания не снижают общей научной и практической ценности диссертационной работы.

### **Соответствие диссертации научной специальности**

Содержание диссертации соответствует требованиям паспорта научной специальности 2.5.5 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки). Область исследований соответствует следующим пунктам паспорта специальности:

2. Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических, химических и комбинированных воздействий.

3. Исследование механических и физико-технических процессов в целях определения параметров оборудования, агрегатов, механизмов и других

комплектующих, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, качества, экологичности и экономичности обработки,

6. Исследование влияния режимов обработки на силы резания, температуру, стойкость инструмента и динамическую жесткость оборудования.

**Отрасль науки** – технические науки, поскольку приведенные результаты исследований дают существенный технический эффект при использовании и внедрении.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что диссертация Мустафаева Энвера Серверовича является научно-квалифицированной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение в области физических процессов модификации режущих кромок микрофрез высокоэнергетическими частицами, вследствие чего повышается стойкость инструмента при их дальнейшей обработке.

#### **Общее заключение**

Диссертационная работа Мустафаева Э.С. направлена на решение актуальной задачи, повышения эксплуатационных характеристик фрез диаметром меньше 1 мм. Предложена комплексная плазменно-пучковая обработка твердосплавных микрофрез, состоящая из обработки инструмента пучками быстрых атомов аргона с энергией 5 кэВ в течение 180 минут для заострения режущих кромок и последующее нанесение износостойких покрытий TiB<sub>2</sub> толщиной 3 мкм методом магнетронного распыления. Разработана модель для расчета силовых параметров при фрезеровании твердосплавными микрофрезами деталей из латуни. Проведены сравнительные испытания фрез без покрытия и с комплексной обработкой. Разработанная технология позволяет повысить стойкость инструмента в 2 раза.

Таким образом, считаем, что диссертация Мустафаева Энвера Серверовича, соответствует требованиям п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842 (с изменениями, внесенными Постановлением



Правительства РФ от 21 апреля 2016г. №335), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Мустафаев Энвер Серверович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки).

Отзыв рассмотрен на заседании кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (протокол №12 от 07.12.2023).

Заведующий кафедрой  
«Технология машиностроения»  
ФГБОУ ВО «УУНиТ»,  
докт. техн. наук, доцент  
Докторская диссертация  
защищена по специальности  
05.16.01 – Металловедение и термическая  
обработка металлов и сплавов

Рамазанов Камиль Нуруллаевич

450076, Приволжский федеральный округ, Республика Башкортостан, г. Уфа,  
ул. Заки Валиди, дом 32  
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»  
Электронный адрес: <https://uust.ru/>  
Телефон: + 7 (347) 229-96-16

