

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

Попов Максим Алексеевич



ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ
ИЗ ХЛАДОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ
ОБРАБОТКИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Максаров В.В.

Санкт-Петербург – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ХЛАДОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ	13
1.1 Особенности эксплуатации изделий и механизмов в условиях климатического холода	13
1.2 Применение хладостойких сталей при изготовлении штоков гидроцилиндров горного оборудования	17
1.3 Технологические особенности финишной обработки изделий из хладостойкой стали 40Х2Н2МА.....	26
1.4 Влияние режущей кромки инструмента на шероховатость поверхности изделий из хладостойких сталей	37
1.5 Способы подготовки режущей кромки инструмента.....	48
1.6 Выводы по первой главе	53
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ КЕРАМИЧЕСКИХ РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН МЕТОДОМ МАГНИТНО- АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ.....	56
2.1 Технология формирования радиуса скругления режущих кромок и шероховатости поверхностей керамических режущих пластин методом магнитно- абразивной обработки	56
2.2 Способ магнитно-абразивной обработки керамических режущих пластин.....	58
2.2.1 Схема магнитно-абразивной обработки режущих пластин	59
2.2.2 Выбор сочетания рабочих движений при обработке режущих пластин.....	61
2.2.3 Магнитно-абразивный комплекс для обработки режущих кромок и поверхностей керамических пластин	65
2.2.4 Определение диапазона рабочих движений магнитно-абразивной обработки керамических пластин.....	67
2.3 Создание рабочей технологической среды при магнитно-абразивной обработке керамических режущих пластин	70

2.3.1 Магнитная индукция при магнитно-абразивной обработке керамических пластин.....	71
2.3.2 Абразивный материал при магнитно-абразивной обработке керамических режущих пластин.....	73
2.3.3 Обоснование выбора смазочно-охлаждающей жидкости для создания технологического инструмента.....	78
2.4 Выводы по второй главе	80
ГЛАВА 3 МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА КЕРАМИЧЕСКИХ РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН	82
3.1 Методика проведения экспериментальных исследований по предварительной подготовке керамических режущих пластин методом магнитно-абразивной обработки.....	83
3.2 Разработка математической модели исследуемого объекта в виде уравнения множественной регрессии второго порядка с помощью рототабельного центрального композиционного планирования (РЦКП)	88
3.3 Влияние магнитно-абразивной обработки на шероховатость поверхности керамических режущих пластин	95
3.4 Влияние технологических факторов магнитно-абразивного метода на производительность процесса обработки керамических режущих пластин	105
3.5 Влияние технологических факторов магнитно-абразивной обработки на радиус скругления режущей кромки	110
3.6 Влияние магнитно-абразивной обработки на качество поверхности керамических режущих пластин	119
3.7. Выводы по третьей главе	126
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРНОСТЕЙ.....	128
4.1 Методика проведения экспериментальных исследований.....	129
4.2 Оценка качества обработанной поверхности изделия из хладостойкой стали 40Х2Н2МА.....	131

4.3 Оценка износостойкости предварительно подготовленного инструмента методом магнитно-абразивной обработки при чистовом точении хладостойких сталей	135
4.4 Оценка влияния предварительно подготовленного инструмента методом магнитно-абразивной обработки на процесс динамической устойчивости механической обработки.....	139
4.5 Совершенствование технологического процесса изготовления штока гидроцилиндра из хладостойкой стали	143
4.6 Практические рекомендации по технологическому обеспечению качества прецизионных поверхностей изделий из хладостойких сталей методом магнитно-абразивной обработки инструмента	144
4.7. Выводы по четвертой главе	147
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	149
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	151
ПРИЛОЖЕНИЕ А Вспомогательные таблицы для построения регрессионных моделей	164
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Планирование эксперимента и результаты экспериментальных исследований	167
ПРИЛОЖЕНИЕ В Технические характеристики приборов	170
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Патент на устройство крепления режущих пластин	173
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акты о промышленном внедрении результатов исследования	175
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Акты внедрения результатов диссертации в учебный процесс	179

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Интенсивный рост добывающей промышленности, связанный с расширением имеющихся и освоением новых месторождений в труднодоступных северных и восточных районах страны, привел к возрастанию потребности горнодобывающей техники северного исполнения.

Из-за нехватки такой техники в районах с низкими температурами в зимний период эксплуатировались машины в исполнении для более умеренного климата. Это вызвало снижение их производительности в среднем в 1,5 раза по сравнению с летним периодом, наработка на отказ уменьшилась в 2-3 раза, а фактический срок службы сократился до 3,5 раз по сравнению с нормативами.

Поэтому одной из важнейших научно-технических проблем является необходимость совершенствования технологии механической обработки хладостойких сталей, работающих в условиях климатического холода.

Для повышения прочностных характеристик изделий и увеличения их срока эксплуатации, хладостойкие стали подвергают термообработке и поверхностному упрочнению, что в свою очередь негативно сказывается на обрабатываемости материала.

Традиционно финишной операцией обработки таких изделий является шлифование, которое имеет ряд негативных последствий, таких как шаржирование абразивными частицами, изменение микроструктуры поверхностного слоя под действием высоких температур, возникновение концентраторов напряжения.

Для нивелирования негативных последствий финишной обработки особую важность приобретает задача обеспечения технологического качества изделий на предшествующей операции чистового точения, способная исключить этап шлифования в технологическом процессе обработки изделий.

С этой целью на операциях чистового точения применяют специально подготовленный инструмент, отличающийся измененной геометрией и более низкой шероховатостью поверхностей.

Предварительная подготовка инструмента перед его использованием в чистовом точении хладостойких сталей осуществляется методом магнитно-

абразивной обработки, что позволяет заменить традиционный метод шлифования чистовым точением, обеспечить высокие эксплуатационные свойства и увеличить ресурс изделий в условиях климатического холода.

Степень разработанности темы исследования

Изучению влияния геометрии инструмента и методов его предварительной подготовки для обеспечения высоких качественных характеристик поверхности изделий из сталей, в том числе хладостойких, посвящен ряд фундаментальных исследований отечественных ученых: В.А. Ванина, С.В. Виноградова, Г.И. Грановского, Ю.Г. Кабалдина, А.У. Маргулеса, Б.Я. Мокрицкого, В.Г. Однолько, А.И. Пронина, А.И. Шепелева, а также зарубежных ученых J.S. Agariou, D.A. Stephenson.

Исследованию технологии магнитно-абразивной обработки в качестве операции по подготовке режущего инструмента посвящены работы отечественных и зарубежных ученых: Ю.М. Барона, В.И. Ждановича, Л.М. Кожуро, В.Е. Оливера, Ф.Ю. Сакулевича, Н.Я. Скворчевского, Н.С. Хомича, П.И. Ящерицына, V.K. Jain, E. Nitano, K. Takazava, T. Shinmura, S. Yin.

Особое внимание формированию режущей кромки инструмента методом магнитно-абразивной обработки уделяли в своих исследованиях Ф.Ю. Сакулевич, Н.Я. Скворчевский, Н.С. Хомич.

Однако предварительной подготовке инструмента методом магнитно-абразивной обработки уделено недостаточно внимания. Формирование новой геометрии инструмента и качественных характеристик его поверхности способно заменить традиционный этап шлифования, обеспечив технологическое качество изделий из хладостойких сталей. Установлению зависимостей магнитно-абразивной обработки инструмента на дальнейший процесс его использования в операциях чистового точения посвящено достаточно мало исследований.

В связи с этим, необходимо проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований, основывающихся на комплексном подходе обеспечения качественных и геометрических характеристик кромок режущего инструмента методом магнитно-абразивной обработки, участвующего в обработке высокотвердых изделий, для замены трудоемкого технологического процесса

шлифования прецизионных поверхностей хладостойких сталей, что является актуальной технологической задачей, требующей своего решения.

Объект исследования. Процесс механической обработки прецизионных поверхностей изделий из хладостойких сталей режущим инструментом, предварительно подготовленным методом магнитно-абразивной обработки.

Предмет исследования. Прецизионные поверхности изделий из хладостойких сталей.

Цель работы – Разработка метода технологического обеспечения повышения качества прецизионных поверхностей изделий из хладостойких сталей за счет использования инструмента на основе режущей керамики с измененной геометрией режущей кромки и уменьшенной шероховатостью передней и задней поверхностей, предварительно достигнутой способом магнитно-абразивной обработки.

Идея работы заключается в технологическом обеспечении качества прецизионных поверхностей изделий из хладостойкой стали при их обработке режущим инструментом, оснащенным сменными многогранными керамическими пластинами, предварительно подготовленными магнитно-абразивным методом и характеризующимися низкой шероховатостью передней и задней поверхностей, а также определенным радиусом скругления режущей кромки инструмента.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается решением нижеуказанных задач:

1. Провести анализ и обобщить теоретические и экспериментальные данные, приведенные в литературных источниках, зависимости качества обработки прецизионных изделий из хладостойких сталей от технологических характеристик и геометрических параметров режущего инструмента;

2. Разработать способ магнитно-абразивной обработки режущих кромок и рабочих поверхностей инструмента, включающий обоснование выбора схемы обработки, рабочих движений, режимных параметров и состава технологической среды;

3. Экспериментально определить влияние технологических параметров магнитно-абразивной обработки на шероховатость поверхностей инструмента,

радиус скругления режущей кромки и удельный съем материала с единицы площади;

4. Разработать регрессионные математические зависимости технологической системы, учитывающие влияние технологических параметров магнитно-абразивной обработки на шероховатость поверхностей инструмента, радиус скругления режущей кромки и удельный съем материала с единицы площади при обработке инструмента на основе режущей керамики марки ВОК-60;

5. Установить зависимость влияния значений шероховатости поверхности и радиуса скругления режущей кромки инструмента марки ВОК-60, подготовленного методом магнитно-абразивной обработки с различными технологическими параметрами, на качество и дефектность изделий из хладостойкой стали;

6. Предложить практические рекомендации по выбору значений технологических параметров магнитно-абразивной обработки, обеспечивающих формирование геометрических параметров режущего инструмента марки ВОК-60 и позволяющих обеспечить высокое технологическое качество прецизионных поверхностей изделий из хладостойких сталей, снизить их шероховатость и повысить сопротивление хрупкому излому.

Научная новизна работы:

1. Разработаны регрессионные математические зависимости и выявлены закономерности влияния технологических факторов (магнитная индукция, время обработки, частота вращения и величина продольной подачи) магнитно-абразивной обработки на шероховатость поверхности, радиус скругления и удельный съем материала с единицы площади при обработке керамического режущего инструмента;

2. Установлены зависимости влияния шероховатости поверхности и радиуса скругления режущей кромки инструмента на основе режущей керамики, подготовленного способом магнитно-абразивной обработки с различными значениями технологических факторов, на качество и шероховатость прецизионных поверхностей изделий из хладостойких сталей.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Получены регрессионные математические зависимости, учитывающие величину магнитной индукции, время обработки, частоту вращения и величину продольной подачи в процессе магнитно-абразивной обработки инструмента на основе режущей керамики марки ВОК-60, позволяющие оценить степень влияния технологических факторов обработки на шероховатость поверхности, радиус скругления режущей кромки и удельный съем материала с единицы площади;

2. Разработан способ крепления сменных многогранных пластин при их магнитно-абразивной обработке (Защищен патентом РФ №212068), включающий в себя схему закрепления пластин, элементы крепления пластин различных форм и типоразмеров, позволяющий произвести равномерную бездефектную обработку;

3. Определены оптимальные режимные параметры магнитно-абразивной обработки кромок режущего инструмента марки ВОК-60, позволяющие удалить существующий оксидный и дефектный слой, обеспечить шероховатость поверхности $R_a = 0,1$ мкм и сформировать радиус скругления режущей кромки ρ в диапазоне от 20 до 40 мкм;

4. Установлено, что применение метода магнитно-абразивной обработки в качестве предварительной операции подготовки инструмента на основе режущей керамики марки ВОК-60 позволяет увеличить период стойкости инструмента в 2,7 раза при обработке хладостойких сталей по сравнению с использованием инструмента базовой конфигурации;

5. Установлено, что применение предварительно подготовленного инструмента на основе режущей керамики методом магнитно-абразивной обработки позволяет заменить процесс шлифования финишным процессом обработки хладостойких сталей точением и достичь шероховатости обрабатываемой поверхности $R_a = 0,8$ мкм;

6. Результаты диссертационной работы прошли апробацию на промышленных предприятиях АО ВО «Электроаппарат» (Акт о внедрении от 12.12.2022 г., утвержден первым заместителем генерального директора А.Н. Грицаевым. Приложение Д) и АО «Завод «Энергия» (Акт о внедрении от 16.03.2023 г., утвержден исполняющим обязанности генерального директора С.Б. Карениным.

Приложение Д), а также отдельные научные положения приняты к внедрению в учебный процесс подготовки бакалавров по направлению 15.03.01 – Машиностроение, программа подготовки «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств» Санкт-Петербургского горного университета (Акт о внедрении от 05.05.2023 г., утвержден проректором по образовательной деятельности Д.Г. Петраковым. Приложение Е).

Методология и методы исследований.

Проведение исследований базировалось на современных положениях теории резания материалов, научных основах технологии машиностроения, статистических методах исследований и методиках математического моделирования.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработанный и реализованный на практике способ магнитно-абразивной обработки кромок и рабочих поверхностей керамических режущих пластин марки ВОК-60, включающий в себя схему обработки, сочетание рабочих движений, диапазон технологических параметров, технологический ферроабразивный инструмент, позволяет увеличить износостойкость и ресурс керамического режущего инструмента, а также снизить время его приработки за счет нивелирования дефектного слоя и следов предыдущей обработки, уменьшить шероховатость режущих поверхностей до $R_a = 0,1$ мкм и сформировать радиус скругления режущей кромки ρ в диапазоне от 20 до 40 мкм;

2. Разработанные регрессионные математические зависимости, учитывающие комбинированное влияние совокупности технологических параметров магнитно-абразивной обработки, позволяют адекватно оценить эффективность варьируемых параметров системы и получить прогнозируемые значения шероховатости поверхности, удельного съема материала с единицы площади, радиуса скругления режущей кромки, подготовив инструмент к последующему использованию в операциях чистового точения;

3. Разработанный и реализованный на практике способ технологической обработки изделия с использование предварительно подготовленного инструмента методом магнитно-абразивной обработки, позволяет сократить количество

проводимых операций, уменьшить период приработки инструмента, увеличить износостойкость инструмента в 2,7 раза, а также повысить устойчивость динамической системы обработки за счет уменьшения автоколебательного процесса и обеспечить качество обработки хладостойких сталей с достижением значения шероховатости $R_a = 0,8$ мкм.

Степень достоверности результатов исследования обеспечена необходимым объемом использованных методов математического планирования эксперимента; проведением лабораторных экспериментов на установке для магнитно-абразивной обработки, базируемой на фрезерном станке с ЧПУ *Emco Concept Mill 250*; результатами промышленного опробования на производственных предприятиях АО ВО «Электроаппарат» и АО «Завод «Энергия», а также апробацией результатов исследований на всероссийских и международных конференциях и публикациями в рецензируемых журналах.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: III Всероссийская научная конференция «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса» (г. Санкт-Петербург, 2020 г.); Международный семинар «Нанозифика и наноматериалы» (г. Санкт-Петербург, 2020 г.); IV Всероссийская научная конференция «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.); Международный симпозиум «Нанозифика и наноматериалы» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.), Международный симпозиум «Нанозифика и наноматериалы» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.).

В полном объеме диссертация заслушана и одобрена на Междисциплинарном экспертном совете ученых Санкт-Петербургского горного университета в 2023 г. Методика использования режущего инструмента, предварительно подготовленного магнитно-абразивным методом, при обработке изделий из хладостойких сталей опробована в производственном процессе предприятий.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной

литературы по теме исследования; разработке метода магнитно-абразивной обработки режущих пластин ВОК-60, установлении математических зависимостей влияния технологических параметров магнитно-абразивной обработки на шероховатость поверхности, удельный съём материала и формирование радиуса скругления режущей кромки инструмента, проведении экспериментальных исследований по обработке хладостойких сталей с предварительно подготовленными режущими пластинами методом магнитно-абразивной обработки, совершенствовании технологии обработки хладостойкой стали с заменой традиционной финишной шлифовальной операции на чистовое точение, подготовке рекомендаций по предварительной подготовке инструмента и технологическому обеспечению качества прецизионных поверхностей изделий из хладостойких сталей.

Публикации по работе. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 10 печатных работах (пункты списка литературы № 29, 41, 51, 52, 53, 54, 78, 79, 93, 103), в том числе в 3 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен один патент (Приложение Г).

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка. Содержит 180 страниц машинописного текста, 74 рисунка, 29 таблиц, список литературы из 113 наименований и 6 приложений на 17 страницах.

Благодарности. Автор выражает благодарность доктору технических наук, профессору, декану механико-машиностроительного факультета Санкт-Петербургского горного университета Максарову Вячеславу Викторовичу за помощь, оказанную при работе над диссертацией, доценту кафедры машиностроения Санкт-Петербургского горного университета Кексину Александру Игоревичу за помощь в организации и проведении экспериментальных исследований.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ХЛАДОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ

1.1 Особенности эксплуатации изделий и механизмов в условиях климатического холода

В связи с освоением Крайнего Севера и Сибири, где наблюдается высокая концентрация горнодобывающих предприятий открытого способа добычи полезных ископаемых, широкое распространение нашел карьерный автотранспорт и оборудование.

Горнодобывающее оборудование эксплуатируется на карьерах в суровых климатических условиях и подвергается низкотемпературному воздействию. Например, продолжительность зимнего периода на карьерах Крайнего Севера превышает 200 суток, а в районах высоких широт может достигать 300 суток [39].

Для этих районов характерны сильные ветры, мощный снеговой покров в течение 8-9 месяцев, резкие колебания давления воздуха, большие перепады температур до 30°C в течение суток, интенсивное образование изморози, высокая относительная влажность воздуха, а также низкая температура окружающей среды до -40°C [30]. Эти внешние факторы значительно затрудняют эксплуатацию техники.

Анализ работы техники в зоне с суровыми климатическими условиями показал, что срок службы оборудования в этой зоне по сравнению с европейской частью России сокращается в 2 раза, а аварии и отказы, связанные с климатическими условиями, выводят из строя до 25% техники [14].

Одним из способов повышения надежности и срока службы оборудования горнодобывающей промышленности, эксплуатируемого в условиях климатического холода, служит использование подходящих материалов.

Основным материалом, применяемым при изготовлении узлов и деталей оборудования, принято считать сталь. Изменение температурных условий, при которых используются изделия из стали, оказывает значительное влияние на их прочностные характеристики, долговечность и эксплуатационные свойства. При

понижении температуры окружающей среды прочность стали увеличивается, но в то же время уменьшается ее пластичность и вязкость [67]. В связи с этим особое внимание уделяется выбору марки стали, которая характеризует свойства материала при работе в условиях низких температур. Среди свойств, в первую очередь обращают внимание на величину прочности материала при максимальных значениях температуры эксплуатации, а также на величину вязкости и пластичности, но уже при минимальных значениях температуры рабочей среды.

Использование стандартных марок стали при изготовлении изделий, работающих в экстремальных условиях климатически низких температур, приводит к значительному снижению ресурса техники и преждевременным поломкам. В связи с этим широкое распространение получила особая группа – хладостойкие стали [21].

К хладостойким относятся стали, способные сохранять достаточно высокое значение вязкости при эксплуатации в условиях низких температур, которые могут находиться в диапазоне от 0 до -296°C . При понижении температуры рабочей среды, в которой эксплуатируется изделие, наблюдается увеличение статической и циклической прочности, возрастает склонность материала к хрупкому излому, а также происходит снижение пластичности и вязкости материала. Поэтому к материалам, которые используются в условиях низких температур климатического холода, предъявляют важное требование – отсутствие хладноломкости.

Хладноломкостью принято называть свойство материалов терять вязкость с понижением температуры рабочей среды и, как следствие, хрупко разрушаться [19]. Характеристика хладноломкости характерна для железа, стали и различных сплавов с ОЦК и ГПУ решетками. Значение хладноломкости принято определять по температурному порогу хладноломкости t_{50} , устанавливаемому при помощи опытных исследований образцов с надрезом при постепенной понижающейся температуре. При достижении температурного порога хладноломкости t_{50} в изломе присутствует более 1/2 волокнистой составляющей, что приводит к уменьшению ударной вязкости материала примерно на 50%.

Надежность работы материала в условиях климатического холода обеспечивается за счет искусственно создаваемого запаса вязкости. При этом

используют материалы с температурным порогом хладноломкости ниже, чем температура рабочей среды. Температурный запас вязкости формируется исходя из различных факторов, оказывающих влияние на склонность материала к хрупкому разрушению. Среди таких факторов можно выделить наличие концентраторов напряжения, размеры изделий, скорость и периодичность нагружения [53]. С повышением температурного запаса вязкости снижается и склонность материала к хрупкому разрушению, а следовательно, и повышаются эксплуатационные свойства и надежность изделия.

На выбор используемого материала, кроме критерия хладноломкости, оказывают влияние и показатели прочности (σ_T , σ_B), совместимость с условиями окружающей и рабочей среды, физические характеристики, технологические свойства и стоимость материала. Среди критериев хладноломкости стоит отметить критерий K_{1c} , характеризующий вязкость разрушения материала в условиях плоской деформации. На сегодняшний день данный критерий мало изучен, что ограничивает его использование при выборе марки материала для изделий, используемых в условиях низких температур.

С целью повышения пластичности материала, увеличения вязкости структуры и сопротивляемости хладноломкому излому стали подвергают процессу легирования с использованием Ni , Cr , Mo , Cu , а также используют микролегирование с применением Nb , V , Ti [18]. Для этих же целей снижают содержание вредных примесей в материале при помощи рафинирования и специальных методов выплавки. Из всех вышеперечисленных элементов на снижение хладноломкости стали оказывает наибольшее влияние содержание в материале никеля.

Никель увеличивает прокаливаемость стали, упрочняет феррит с одновременным увеличением параметра вязкости, а также снижает содержание вредных примесей на дислокациях, уменьшает размер зерен [54, 55].

При содержании хрома в стали до 1% увеличивается прочность материала и его вязкость. При содержании хрома более 1,5% повышается порог хладноломкости материала.

Содержание в составе меди приводит к возрастанию прочности стали, которая достигается за счет упрочнения твердого раствора, при этом уменьшается

размер зерен. Однако при превышении значения 0,8% содержания меди в материале наблюдается красноломкость [18; 19; 55].

Азот с сильными нитридообразующими элементами (*V, Nb, Ti*), выделяясь из твердого раствора в виде нитридов, способствует снижению размера зерна, повышает прочность стали, при этом не влияет на снижение хладноломкости материала.

Для обеспечения высокого показателя критерия хладноломкости используют феррито-перлитные стали. В этих сталях обеспечивают низкое содержание углерода в материале с одновременным микролегированием карбидообразующими элементами. К числу таких сталей с нормальной и повышенной прочностью можно отнести марки 14Г2САФ, 09Г2СД, 10ХСНД и другие [33].

Например, марки сталей 14Г2САФ, 14Г2АФ и 16Г2АФ нашли широкое применение при производстве газопроводных труб с диаметром 1000-1400 мм.

Современная металлургическая промышленность поставляет хладостойкие стали 12ХН2МД-Ш, ОН9-СШ, 10ГНБ-Ш с минимальным пределом текучести до 390 МПа в виде горячекатаного или толстолистового проката.

При низких температурах эксплуатации горнодобывающей техники и оборудования значительно ухудшается их надежность и производительность по причине повышения теплоотдачи двигателей, охлаждения узлов и агрегатов, хладноломкости металла. Высокая влажность окружающей среды негативно сказывается на пневмо и гидросистемах. Например, влага, конденсирующаяся в топливных баках, может приводить к возникновению ледяных пробок.

Снижение температуры рабочей среды приводит к ухудшению запуска двигателей и к общему снижению эффективности работы топливной системы в целом. Это происходит по причине парафинизации и загустеванию дизельного топлива [15]. Значительное повышение вязкости используемых моторных масел влечет за собой повышенный износ шатунно-поршневой группы. При холодном пуске двигателя наблюдается склонность к аварийному износу вкладышей коленчатого вала. Поступление холодного воздуха в цилиндры двигателя повышает их наполнение избыточным воздухом, что приводит к ухудшению смесеобразованию и, как следствие, затрудняется самовоспламенение рабочей

смеси. Исследования показывают, что снижение температуры масла увеличивает износ двигателя примерно в 2,5 раза [75]. При этом наблюдается повышение числа отказов гидросистем.

Нормальная работа гидросистем обеспечивается при эксплуатации в рабочей среде, при которой температура жидкости находится не ниже значения в 20°C. В этом случае вязкость рабочей жидкости находится в пределах допустимых значений. В свою очередь повышение вязкости приводит к разрушению золотников и других элементов управляющей аппаратуры, а также затрудняет нормальную подачу насосов. Высокая вязкость рабочей жидкости негативно сказывается на запаздывании срабатывания предохранительных клапанов, приводит к заеданию золотников, что в конечном случае приводит к аварийным ситуациям машин [15; 30; 39; 75].

На нормальную работу гидравлических систем зимой оказывает сильное влияние снижение эластичности и хладноломкость изделий, выполняющих функцию силовых агрегатов. Среди таких изделий можно выделить гидроцилиндр, в конструкцию которого входит шток, являющийся одной из частых причин выхода из строя гидравлических систем горного оборудования.

1.2 Применение хладостойких сталей при изготовлении штоков гидроцилиндров горного оборудования

Основным исполнительным элементом, используемым в любой гидравлической системе горнодобывающего оборудования, является силовой гидроцилиндр. Задачей силового гидроцилиндра является осуществление поступательного движения выходного звена. Гидроцилиндры принято разделять по виду действия: одностороннего и двустороннего действия [22].

При одностороннем действии шток гидроцилиндра под действием давления жидкости перемещается в одном направлении, а обратный ход становится возможным при воздействии внешней силы, например пружины. При этом рабочая жидкость вытесняется из полости гидроцилиндра.

Наибольшее распространение в горнодобывающей промышленности приобрели силовые гидроцилиндры двустороннего действия. Особенностью

данного вида гидроцилиндров является то, что рабочая жидкость поступает в обе рабочие полости при этом обеспечивает рабочий и обратных ход поршня.

Поршневой гидроцилиндр состоит из: штока 1, вставки 2, крышек 3, 4 и 6, гильзы 5 и других стандартных элементов 7-17 (рисунок 1.1).

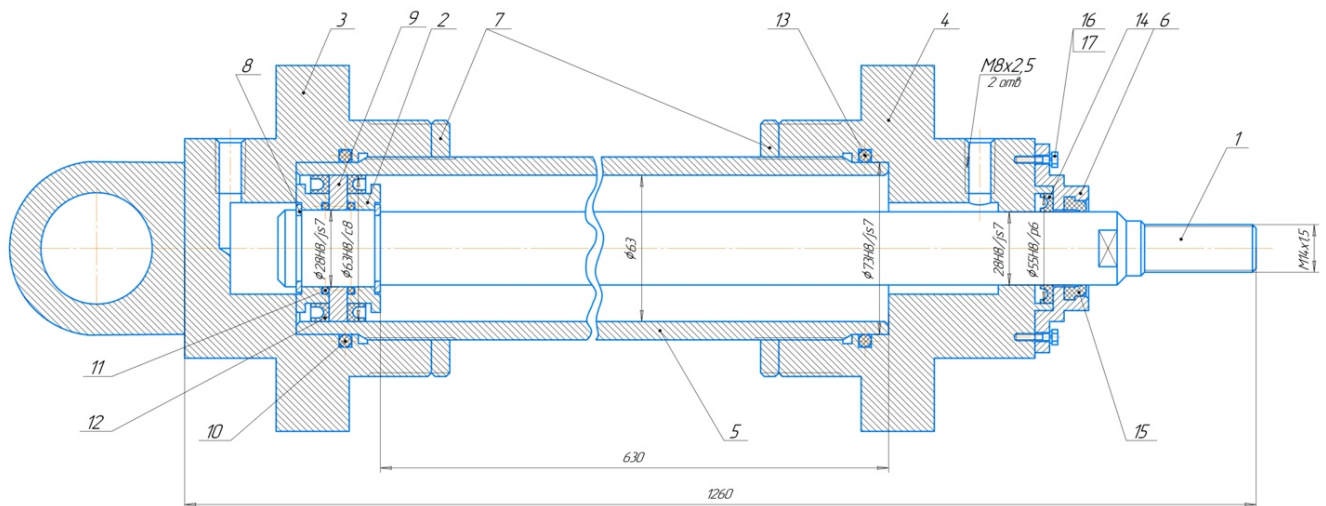


Рисунок 1.1 – Чертеж поршневого гидроцилиндра

Анализ результатов дефектации гидроцилиндров выявил виды дефектов после их эксплуатации в агрессивной среде [28]. Среди основных дефектов можно заметить: смятие поверхности, коррозия, отслоение нанесенного защитного слоя, вмятины, излом, изгиб, нарушение соосности и излом. Результаты проведенного анализа дефектов гидроцилиндров, которые являются причиной преждевременного выхода из строя и поломки элементов гидросистемы, приведены в таблице 1.1.

Среди основной причины выхода из строя гидравлических систем можно выделить нарушение его герметичности, что сказывается на возникновении протечек. Причиной появления протечек может являться недостаточная точность обработки внутренних поверхностей гильзы и корпуса. На появление нежелательных протечек также может влиять невысокая точность обработки внешних поверхностей штока и поршня, состояние и качество изготовления которых оказывает весомое влияние на ресурс гидравлического оборудования.

Таблица 1.1 – Основные виды и причины появления дефектов гидроцилиндров

	Шток	Поршень	Цилиндр	Грундбукса
Вид повреждения элементов гидроцилиндра	Механический износ, абразивный износ, отслаивание и шелушение нанесённого покрытия, растрескивание хромового покрытия, возникновение коррозии, деформация при эксплуатации, излом.	Механический износ, абразивный износ внутренней и наружной поверхности.	Механический износ, абразивный износ «зеркала» внутренней поверхности цилиндра, возникновение коррозии.	Механический износ, абразивный износ рабочей поверхности.
Фотография наблюдаемого повреждения				
Возможные причины возникновения повреждения	<p>Конструктивные: недостаточная герметичность, незащищенность от коррозии и внешнего воздействия среды ответственных элементов.</p> <p>Эксплуатационные: повышение нагрузки, превышающей расчетные, загрязненная рабочая жидкость, действия агрессивной среды.</p> <p>Технологические: некачественное нанесение покрытий, возникновение дефектов при сборке, плохая химическая и механическая предварительная подготовка поверхностей изделия перед нанесением покрытий.</p>			

Практическое применение гидроцилиндров в условиях Крайнего Севера и Сибири показывает возникновение непредвиденных поломок и отказов [20], сказывающихся на нарушении заданных функциональных параметрах гидравлического привода. Проведенный анализ видов и причин появления дефектов гидроцилиндров позволил установить, что наиболее частой причиной выхода из строя гидроцилиндров является нарушение уплотнительной системы по причине износа и поломки штока.

На разрушение уплотнительной системы гидроцилиндра оказывают влияние качественные характеристики поверхности штока, формируемые на финишной операции шлифования. На данной операции возникает эффект шаржирования и насыщения абразивными зернами поверхности штока, появляются концентраторы напряжений, которые и приводят к истиранию поверхности изделия при эксплуатации. Вышеуказанные последствия финишной обработки штока и являются основными причинами разрушения уплотнительной системы гидроцилиндра.

К основным видам износа штока гидроцилиндра относят [45]: отслаивание и растрескивание защитного слоя (рисунок 1.2), вмятины, трещины, забои (рисунок 1.3), абразивный износ, задиры, риски коррозия рабочей поверхности (рисунок 1.4), а также изгиб штока при силовых нагрузках (рисунок 1.5).

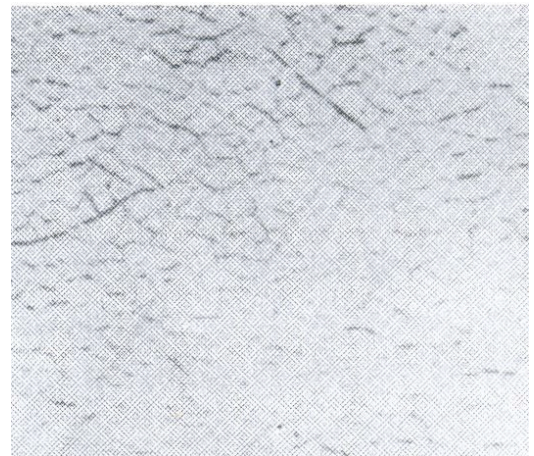
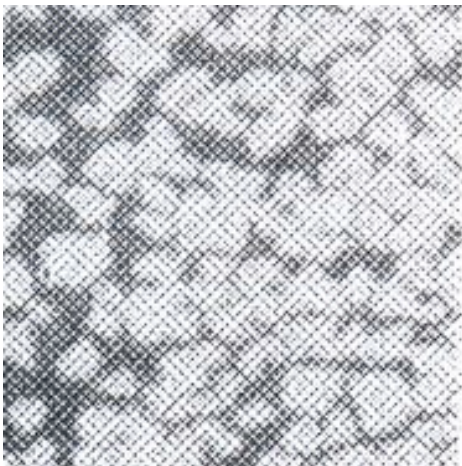


Рисунок 1.2 – Отслаивание и растрескивание защитного слоя штока гидроцилиндра

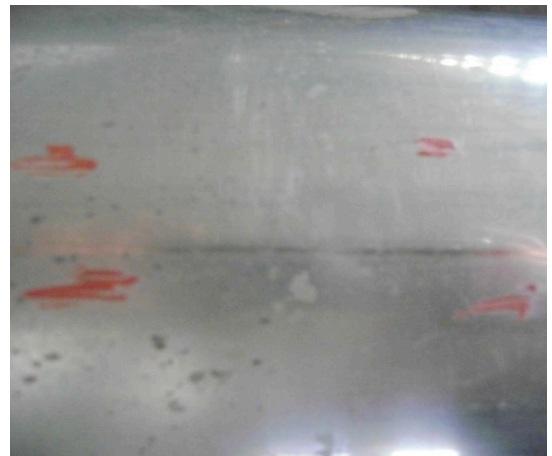
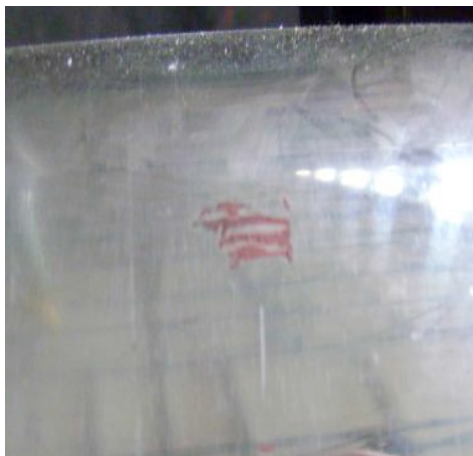


Рисунок 1.3 – Вмятины, трещины, забои штока гидроцилиндра

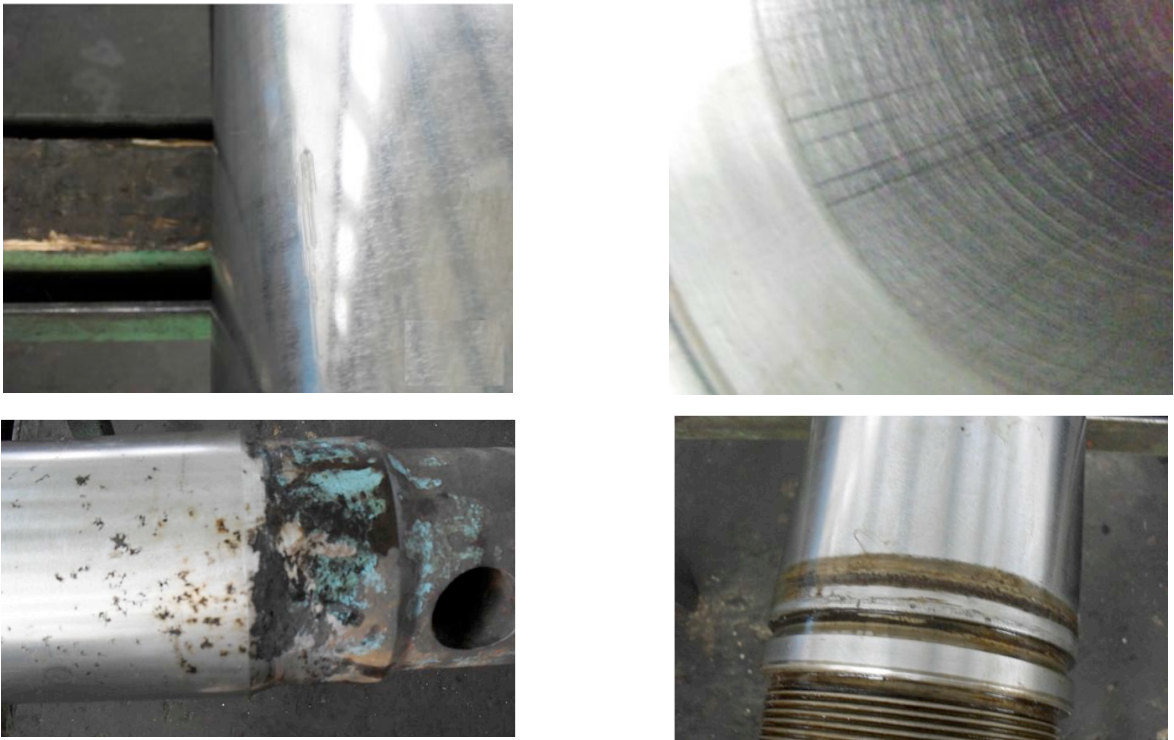


Рисунок 1.4 – Абразивный износ, задиры, риски коррозия рабочей поверхности

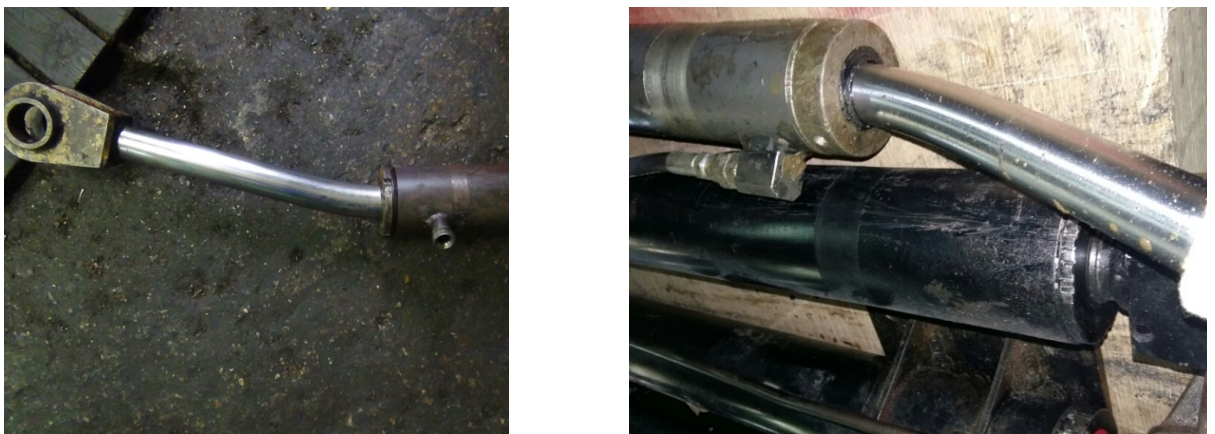


Рисунок 1.5 – Изгиб штока гидроцилиндра

Наследственность материала, полученная в результате финишной обработки штока гидроцилиндра, негативно влияет на его эксплуатационные свойства и надежность.

При финишной шлифовальной операции происходит формирование величины шероховатости поверхности штока, которая оказывает значительное влияние на износостойкость и эксплуатационные свойства изделия.

Значение шероховатости также определяет характер износа штока и интенсивность процессов, которые протекают на его рабочих поверхностях, таких как наличие концентраторов напряжения, адгезионный износ упрочняющих

покрытий, ударную и усталостную прочность, износ в результате трения элементов, коррозионную стойкость и другое.

В технологическом процессе изготовления штока гидроцилиндра на круглошлифовальной операции существует проблема [57], которая связана с появлением нежелательного эффекта шаржирования. В процессе обработки наблюдается насыщение поверхности абразивными элементами и микрочастицами от шлифовального круга.

Кроме этого, при шлифовании штока могут возникать структурные изменения поверхностного слоя в результате появления шлифовочных прижогов. Все это приводит к появлению на пограничных участках шлифовочных трещин, которые являются концентраторами напряжения и оказывают влияние на снижение износостойкости и хладостойкости, а также негативно воздействуют на прочность изготавливаемой детали [11].

Из это можно сделать заключение о том, что поверхность штока гидроцилиндра, имеющая различные вкрапления абразивных частиц, с одновременными периодическими ударно-вибрационными нагрузками приводит к возрастанию интенсивности износа уплотнений, которые усиливаются сниженной усталостной прочностью. Все это разрушает герметичность системы гидроцилиндра.

Для изготовления штоков гидроцилиндров используются конструкционные стали 35, 45, 20Г2 и 40Г2, а при повышенных нагрузках и температурах – 38ХМА, 40Х, 40ХМ, 40Х2Н2МА, 38ХГМ и 08Х18Н10Т.

Среди всех сталей, применяемых при изготовлении штока гидроцилиндра, эксплуатируемого в условиях климатического холода, наибольшее распространение получила конструкционная легированная сталь 40Х2Н2МА [34]. Она представлена легированной структурой, которая может выдерживать существенное воздействие влаги и некоторых химических веществ. Концентрация углерода в стали составляет примерно 0,40%, что в сочетании с такими легирующими элементами как хром и молибден определяют высокие прочностные свойства и эксплуатационные характеристики материала, а присутствие в составе

стали никеля обеспечивает достаточный запас пластичности, вязкости и хладостойкости.

В составе сплава присутствуют легирующие элементы: хром, никель и молибден. Подробный химический состав стали 40X2H2MA представлен в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Химический состав стали 40X2H2MA, % (ГОСТ 4543-71)

Fe	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S	Cu
							не более		
95%	0,35- 0,42	0,17- 0,37	0,3-0,6	1,35- 1,75	1,25- 1,65	0,2-0,3	0,025	0,025	0,30

Для обеспечения высоких эксплуатационных характеристик штоков гидроцилиндров из стали 40X2H2MA проводят его термическую обработку (Таблица 1.3) [19; 50].

Таблица 1.3 – Режимы термической обработки изделий из стали 40X2H2MA

Группа стали	Термическая обработка				
	Закалка			Отпуск	
	Температура, °С нагрева под		Охлаждающая среда	Температура, °С	Охлаждающая среда
	1-ю закалку или нормализацию	2-ю закалку			
Хромо- никель- молиб- деновая	870	-	Масло	600	Вода и масло

Сталь марки 40X2H2MA относят к классу перлитных сталей. Данная сталь характеризуется наличием двух температурных переходов: $A_{c1} = 740^{\circ}\text{C}$ и $A_{c3} = 805^{\circ}\text{C}$.

Доэвтектоидная сталь, как правило, подвергается полной закалке. Оптимальная температура нагрева такой стали является температура $A_{c3} + (30-50^{\circ}\text{C})$ [18; 19; 50; 55]. Нахождение стали в данном температурном диапазоне

позволяет получить при нагреве мелкозернистый аустенит, а после охлаждения – мелкозернистый мартенсит. На границе между цементитной и ферритной фазами происходит образование зерен аустенита [18; 50]. Наряду с растворением цементита в аустените происходит еще аллотропный переход железа α в раствор железа γ . Процесс растворения цементита протекает медленнее, чем образование кристаллов аустенита, и поэтому требует некоторой выдержки после достижения температуры закалки [50; 55].

В результате термообработки получаем высокие механические свойства стали 40X2H2MA (Таблица 1.4) [50], которые позволяют значительно увеличить ресурс изделий при эксплуатации оборудования в условиях климатического холода.

Таблица 1.4 – Механические свойства стали 40X2H2MA при комнатной температуре

ГОСТ	Режим термообработки			Сечение мм	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ	ψ	KCU
	Операция	t °C	Охлаждающая среда		Н/мм ²		%		Дж/см ²
					не менее				
4543- 71	Закалка	855- 885	Масло	Свыше 150	930	180	7	35	66
	Отпуск	550- 650	Вода или масло						

Стоит отметить, что ударная вязкость материала KCU должна находиться выше 30 Дж/см², что является важным требованием для использования изделия в условиях низких температур. Значение этого показателя изменяется при снижении температуры эксплуатации относительно комнатной. При закалке и высоком отпуске ударная вязкость стали соответствует значениям, указанным в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Характеристика ударной вязкости KCU стали 40X2H2MA при закалке с 880°C в масле, отпуске при 600°C в воде

Ударной вязкости KCU , Дж/см ²					
+20°C	0°C	-20°C	-40°C	-60°C	-80°C
139	-	122	128	125	-

При условии эксплуатации штока гидроцилиндров с окружающей температурой воздуха -40°C формируется ударная вязкость $KCU = 128$ Дж/см², что позволяет воспрепятствовать хрупкому излому и хладноломкому разрушению изделия. Также отметим, что снижение температуры приводит к увеличению предела прочности σ_B (рисунок 1.6).

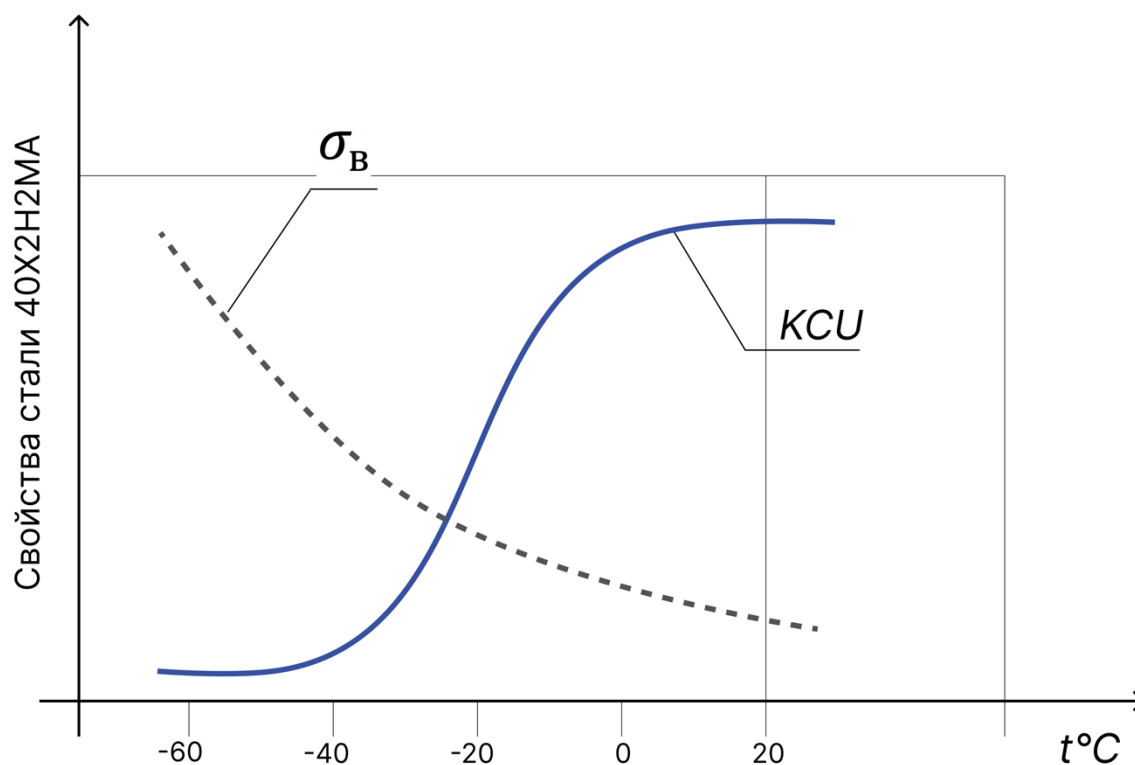


Рисунок 1.6 – Свойства стали 40X2H2MA в зависимости от температуры эксплуатации, $t^{\circ}\text{C}$

При термической обработке хладостойкой стали 40X2H2MA с описанными условиями закалки и отпуска, достигаются высокие эксплуатационные свойства штока гидроцилиндра. Следующей важной задачей, которая позволяет обеспечить

высокое качество прецизионных поверхностей штока гидроцилиндра, является совершенствование технологии его финишной обработки.

1.3 Технологические особенности финишной обработки изделий из хладостойкой стали 40Х2Н2МА

Решение проблемы появляющихся повреждений силовых гидроцилиндров, при условии ограниченного выбора материалов его изготовления, в значительной мере может заключаться в качественной обработке штоков [22].

В процессе обработки рабочих поверхностей штока гидроцилиндров должны достигаться заявленные технические требования к изделию, которые заключаются в обеспечении рабочих посадок с предельным отклонением $h6$, непрямолинейность оси должна составлять не более 0,03 мм на всей длине штока 428 мм, значение неперпендикулярности торца должно составлять менее 0,01 мм, биение рабочей поверхности изделия по отношению к поверхности шейки не более 0,01 мм, овальность и конусность в пределах указанных допусков, шероховатость поверхности не ниже значения $R_a = 0,8$ мкм (рисунок 1.7).

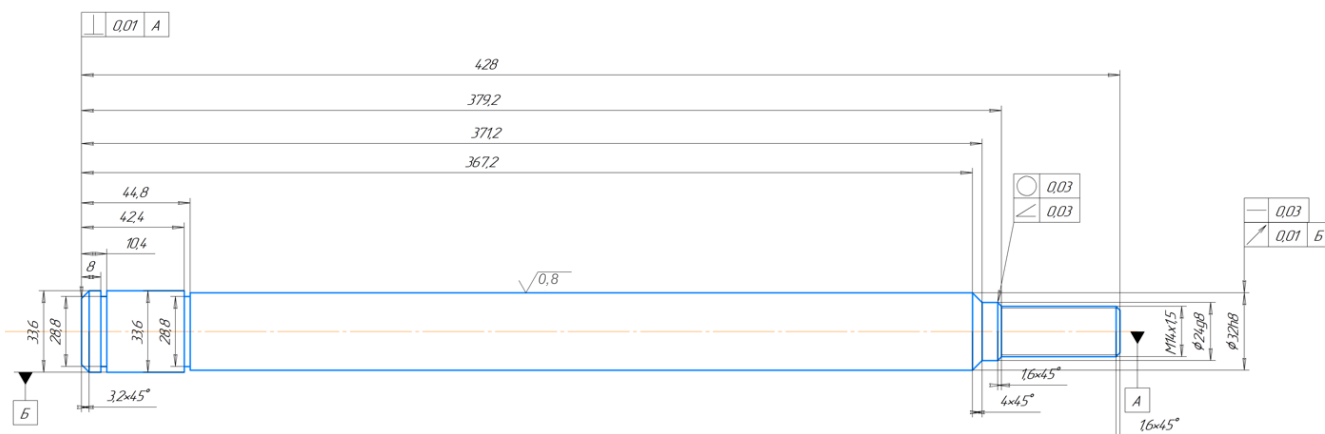


Рисунок 1.7 – Технические требования при обработке штока гидроцилиндра

На цилиндрическом участке штока длиной 367,2 мм с внешним диаметром $\phi 33,6$ мм при помощи круглошлифовальной операции происходит формирование качественных характеристик поверхности. Применяемый вид обработки приводит к шаржированию поверхности абразивными зернами, возникновению усталостной прочности, уменьшению износостойкости. Это негативно сказывается на эксплуатационных свойствах штока гидроцилиндра [1]. Для устранения

негативных последствий круглошлифовальной операции при обработке штока гидроцилиндра рекомендуется изменить существующий технологический процесс, убрав финишную шлифовальную операцию и обеспечив требуемые показатели качества изделия на предшествующей операции чистового точения.

Стоит заметить, что обеспечение качественных характеристик поверхности штока гидроцилиндра на различных этапах обработки требует проведения детального анализа на выявление факторов, способствующих формированию точности формы изделия и шероховатости его поверхности. Определение данных факторов в значительной мере может сказаться на достижении требуемых геометрических и качественных параметров поверхности штока гидроцилиндра согласно рисунку 1.7, без применения финишной шлифовальной операции, что увеличит эксплуатационные свойства гидроцилиндра за счет повышения качества изготовления штока.

Характеристики поверхностного слоя непосредственно связаны с усталостной прочностью, с контактной жесткостью, коррозионной стойкостью, виброустойчивостью, плотностью соединений, прочностью сопряжений, теплоотражением и другими эксплуатационными показателями.

Совокупность таких характеристик поверхности изделия как, шероховатость и волнистость, химические и физико-механические свойства, микроструктура поверхностного слоя, определяют ее качество. Данные характеристики формируются в процессе изготовления детали и приводят к появлению неровностей в поверхностном слое, изменению структуры, химического и фазового составов, а также к возникновению остаточных напряжений. Все это оказывает прямо влияние на эксплуатационные свойства изделия.

Требуемые показатели эксплуатации деталей в заданных условиях неотъемлемо связаны с требованиями технологического процесса, когда необходимая точность изделия и его качественные характеристики достигаются лезвийной обработкой. Силы, возникающие в процессе резания, в условиях упругой технологической системы приводят к погрешности формы и размеров изготавливаемого изделия, а также оказывают влияние на характеристики качества обработанной поверхности изделия [12].

Механическая обработка приводит к появлению пластической деформации на поверхности изделия, что в свою очередь влияет на повышение твердости и возникновение внутренних остаточных напряжений, а также влияет на образование наклепа на поверхности обрабатываемого материала. Кроме этого, при резании металлов наблюдаются процессы тепловыделения, наростообразования и трения, что в конечном итоге влияет на формирование поверхности изделия и износостойкость инструмента.

В первую очередь, эти процессы зависят от величины подачи, скорости и глубины резания, а также от самого инструмента: его материала, физико-механических свойств и геометрии.

Из этого следует, что наиболее перспективным направлением развития процесса обработки материалов является обеспечение оптимальных режимных параметров и формирование правильной системы станок-инструмент-заготовка, которая приводит к увеличению производительности процесса резания. В результате механической обработки совокупность свойств, которые приобретаются поверхностью заготовки, можно описать в виде «качество поверхности» [49; 68; 74].

Качество поверхностного слоя описывают геометрическими показателями, такими как макро и микрогеометрией, волнистостью, а также при помощи физико-механических и физико-химических свойств (рисунок 1.8). Описанные характеристики оказывают существенное влияние на износостойкость, коррозионную стойкость и сопротивление усталости [12].

Механические и физические свойства изделия определяются микротвердостью поверхностного слоя, величиной и распространением остаточных напряжений, а также глубиной их залегания, структурными и фазовыми изменениями материала, изменением кристаллической решетки. Указанные свойства определяются местным нагревом зоны обработки и упругопластическим деформированием [47].

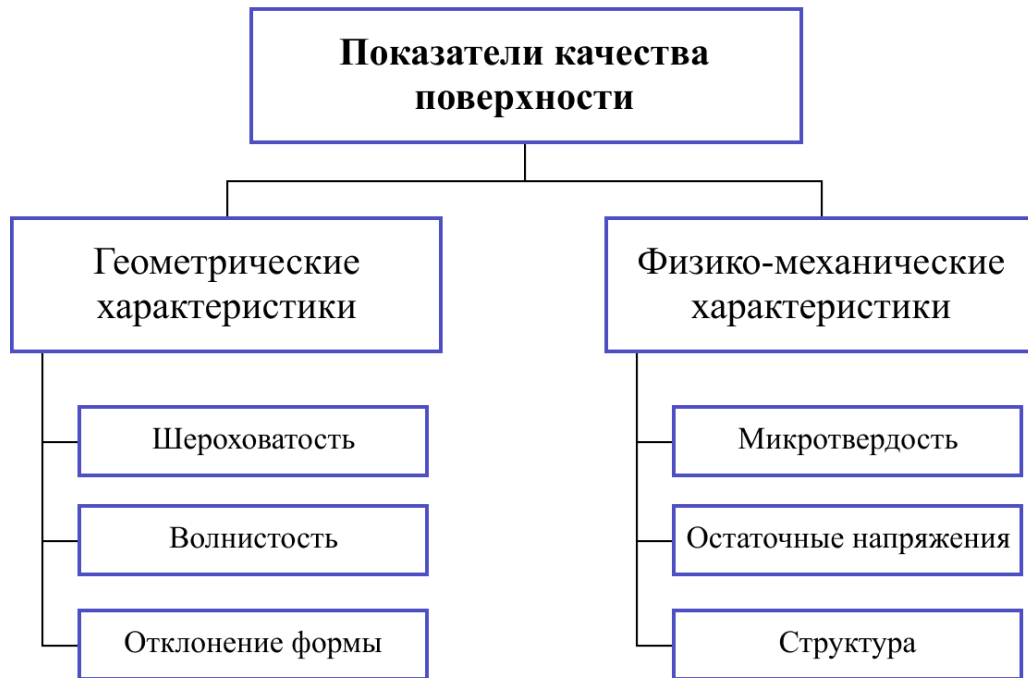


Рисунок 1.8 – Показатели качества поверхности

Процесс формирования качества поверхностного слоя штока гидроцилиндра, в том числе шероховатости, упрощенно можно представить в виде определенной модели, состоящей из периодической и детерминированной основы, а также включающей в себя случайную компоненту.

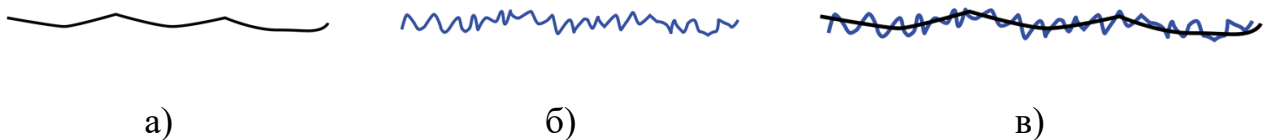


Рисунок 1.9 – Модель шероховатости поверхности, где: а) периодическая основа, б) случайная основа, в) суммарная составляющая

К представленной на рисунке 1.9 (а) [49] периодической основе относятся систематические погрешности тепловых и силовых деформаций элементов технологической системы, автоколебания, подача, режущая кромка и т.д.

К факторам на случайной основе, представленной на рисунке 1.9 (б) [49] можно отнести любые случайные внутренние и внешние воздействия, случайные погрешности силовых и тепловых деформаций элементов технологической системы, различные случайные локальные изменения физико-механических

свойств материала, которые являются определяющими для упругих и пластических деформаций.

Расчет значения периодической составляющей производится согласно схеме, которая представлена на рисунке 1.10 [68]. По формуле (1.1) рассчитывается высота неровностей профиля поверхности.

$$R_z = h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \quad (1.1)$$

где h_1 – величина, формируемая геометрией режущего инструмента и кинематикой движений при обработке заготовки;

h_2 – величина, формируемая вследствие колебаний инструмента;

h_3 – величина, определяемая пластическими деформациями в зоне резания;

h_4 – величина, определяемая характеристиками режущей кромки.

В процесс обработки внешней поверхности штока на операциях чистового точения формируется профиль, отличный от предварительно расчётного. Величина отклонения профиля зависит от вторичных пластических деформаций в зоне резания и упругого восстановления поверхностного слоя.

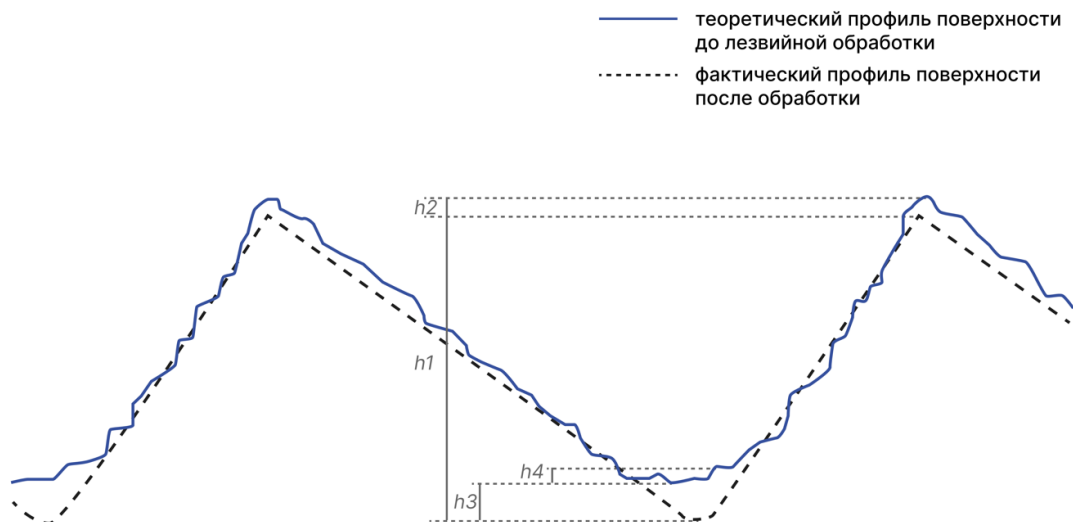


Рисунок 1.10 – Схематичное представление расчета профиля шероховатости

Проявление вторичных пластических деформаций в зоне резания металла приводит к появлению таких дефектов, как задиры, вырывы и деформации остаточных гребешков на обработанной поверхности. Деформация остаточных гребешков отчетливо заметна при токарной обработке изделия с малыми значениями подачи. Такой режим обработки заготовки является причиной

возрастания микронеровностей и приводит к увеличению вероятности проявления случайной составляющей.

Другим фактором, который оказывает влияние на формирование шероховатости в процессе обработки, является жесткость технологической системы. Зависимость значения шероховатости R_z от жесткости технологической системы продемонстрирована на рисунке 1.11 [68]. По результатам анализа зависимостей делается вывод о том, что увеличение значения подачи приводит к повышению этого влияния. Стоит также отметить, что одно значение шероховатости может достигаться при различных подачах. Из этого следует, что обеспечение требуемого качества поверхности заготовки и ее шероховатости зависит в том числе от жесткости технологической системы.

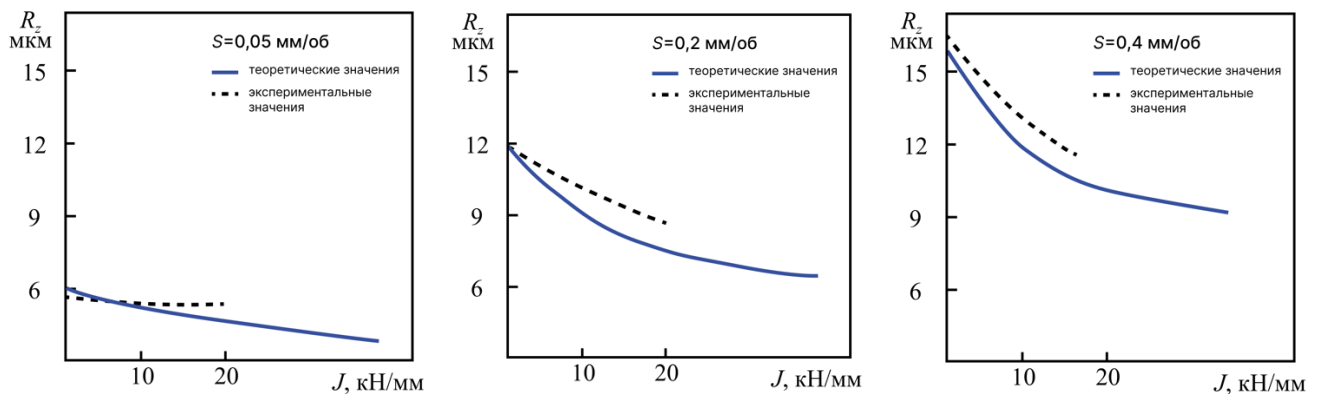


Рисунок 1.11 – Зависимость шероховатости R_z от жесткости технологической системы

Шероховатость принято считать одной из главных характеристик качества поверхности изделия, оказывающей наибольшее влияние на эксплуатационные свойства детали. В период работы поверхности изделия подвергаются внешнему воздействию окружающей среды или со стороны других структурных элементов изделия, что приводит к истиранию поверхности, смятию, эрозионному и коррозионному износу, а также разрушению в результате кавитации. Эти процессы протекают в поверхностном и приповерхностном слоях изделия. Формирование правильного геометрического профиля и шероховатости поверхности определяют качество изделия, что в конечном итоге положительно сказывается на увеличении его долговечности и надежности.

Выбранный для анализа параметр шероховатости R_a обуславливается тем, что по функциональным параметрам изделия необходимо ограничить среднее арифметическое отклонение профиля.

Исследования показывают, что с увеличением величины подачи инструмента увеличивается величина шероховатости (рисунок 1.12, а). В тоже время снижение подачи менее 0,04 мм/об является нецелесообразным по экономическим причинам в связи с возрастанием времени обработки и незначительным влиянием на снижение шероховатости поверхности.

На достижение требуемых показателей шероховатости поверхности изделий также оказывает влияние скорость резания (рисунок 1.12, б). Наименьший параметр шероховатости достигается при наибольшей величине скорости резания, при соблюдении прочих равных условий [35; 68; 73].

Глубина резания является незначительным фактором, который в меньшей степени оказывает влияние на шероховатость (рисунок 1.13). Варьирование значения шероховатости при возрастании глубины резания связывают с изменением физико-механических свойств материала, который находится непосредственно в зоне резания [35; 68; 69].

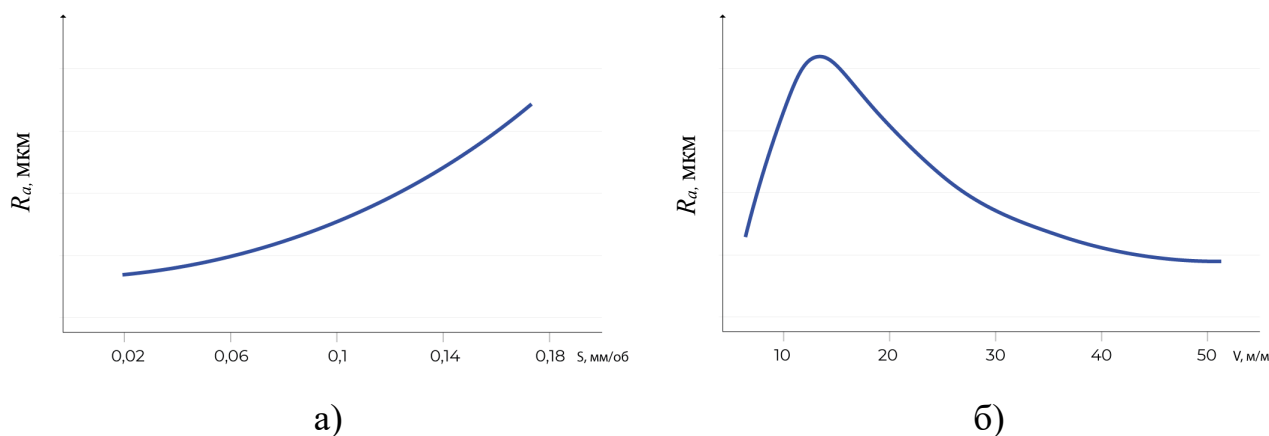


Рисунок 1.12 – Влияние на величину шероховатости: а) величины подачи, б) скорости резания

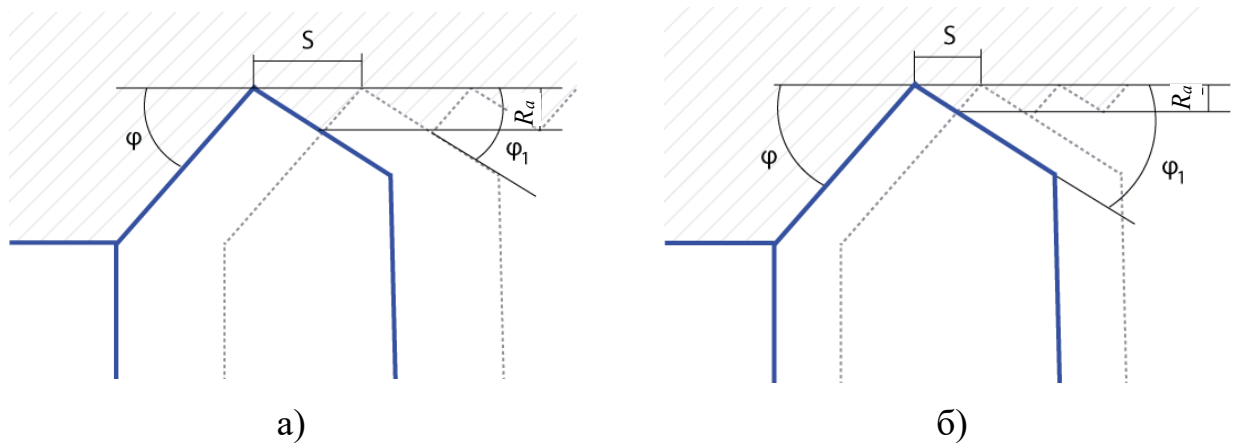


Рисунок 1.13 – Влияние глубины резания на шероховатость обрабатываемой поверхности

Среди обозначенных параметров на шероховатость поверхности оказывает влияние геометрия и состояние режущей кромки инструмента. Внимание стоит уделить главному углу в плане φ и вспомогательному φ' , радиусу округления вершины резца (рисунок 1.14) [5; 68; 69; 73].

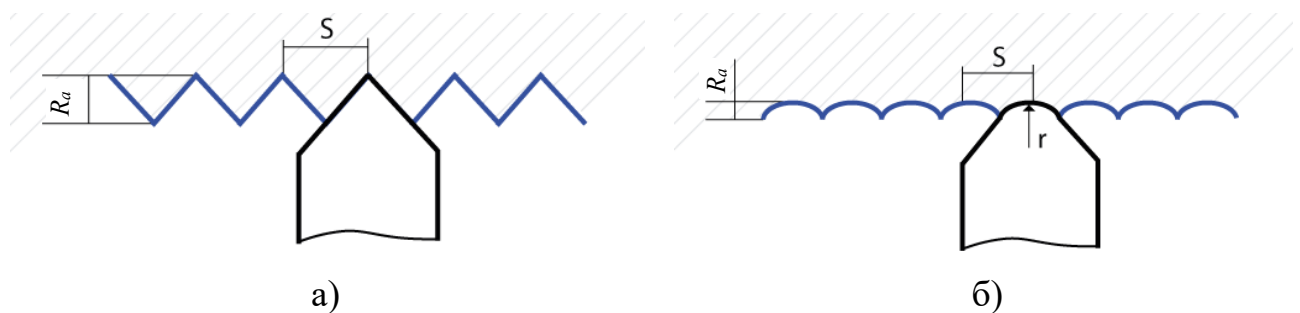


Рисунок 1.14 – Влияние величины округления режущей кромки на шероховатость поверхности, где: а) острая кромка, б) закругленная кромка

Процесс обработки заготовки сопровождается наростообразованием на инструменте, что в свою очередь приводит к относительному изменению положения режущей кромки инструмента, ее затуплению и, как следствие, к увеличению шероховатости и температуры в зоне резания (рисунок 1.15) [7; 68; 70].

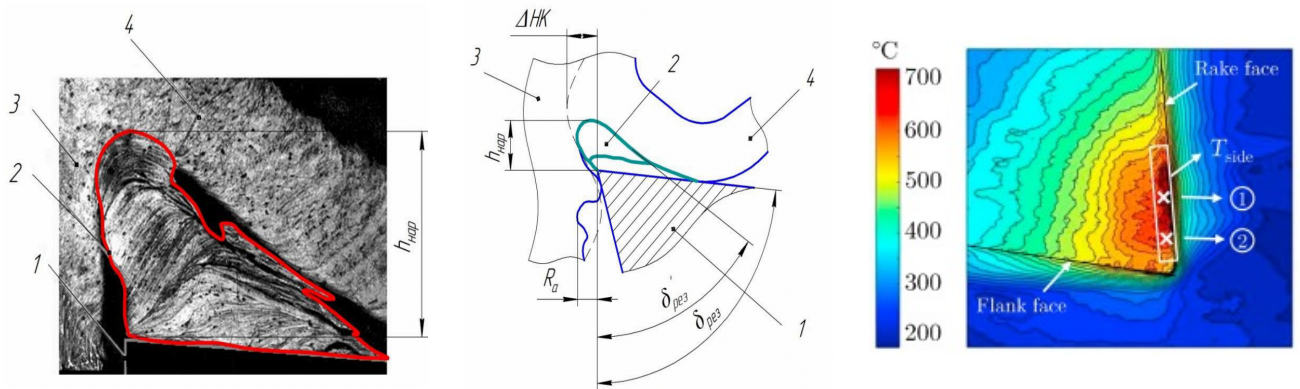


Рисунок 1.15 – Влияние образования нароста на кромке инструмента на точность в поперечном сечении $\Delta НК$, возрастание шероховатости R_a и изменение температуры в зоне резания, где: 1 – инструмент; 2 – образованный нарост; 3 – поверхность обработки; 4 – снимаемая стружка; $\delta_{рез}$ – угол резания; $\delta_{рез}'$ – угол резания при возникшем наросте

При обработке металла возникает температура до 900°C в зоне, где режущая кромка деформирует заготовку и срезает слой материала с обрабатываемого изделия. Длительный процесс обработки характеризуется стабильным и линейным нагреванием. Элементы обрабатывающей системы поглощают тепло, которое образуется в процессе резания в следующем отношении: 10% – заготовка, 80% – стружка, 10% – инструмент.

Распределение тепла в зоне резания во многом зависит от теплопроводности материала. При обработке материала с низким значением теплопроводности основное тепло распределяется в инструмент. Стоит отметить, что твердость материала также оказывает влияние на процесс выделения тепла в зоне резания, чем выше значение твердости материала, тем больше тепла выделяется в процессе обработки. Высокие скорости резания приводят к большему тепловыделению, а при высокой подаче в процессе обработки увеличивается площадь режущей кромки, что также приводит к росту температуры в зоне резания.

Изменение физико-механических и геометрических параметров режущего инструмента в процессе токарной обработки приводит к смещению этого баланса, что негативно сказывается на повышении износа и преждевременному выходу из строя инструмента.

Исследования показывают, что при обработке изделия лезвийным инструментом преобладающим влиянием обладают силовые факторы, по причине которых может произойти разрушение структуры материала, изменение кристаллического строения решетки, что приводит к возрастанию значения микротвердости и резкому изменению температурного поля в зоне резания. Это характеризуется возникновением положительных или отрицательных остаточных напряжений в зависимости от режима обработки изделия [89].

Механическая обработка приводит к нарушению баланса остаточных напряжений. Вследствие чего осуществляется процесс их перераспределения. При этом значительную роль оказывает способ получения изделия, который определяет характер и величину остаточных напряжений. Также на значение остаточных напряжений влияют размеры и конфигурация заготовки.

Но, кроме этого, сам процесс резания служит источником возникновения остаточных напряжений, в следствии повышения температуры в зоне резания и пластической деформации поверхностного слоя (рисунок 1.16).

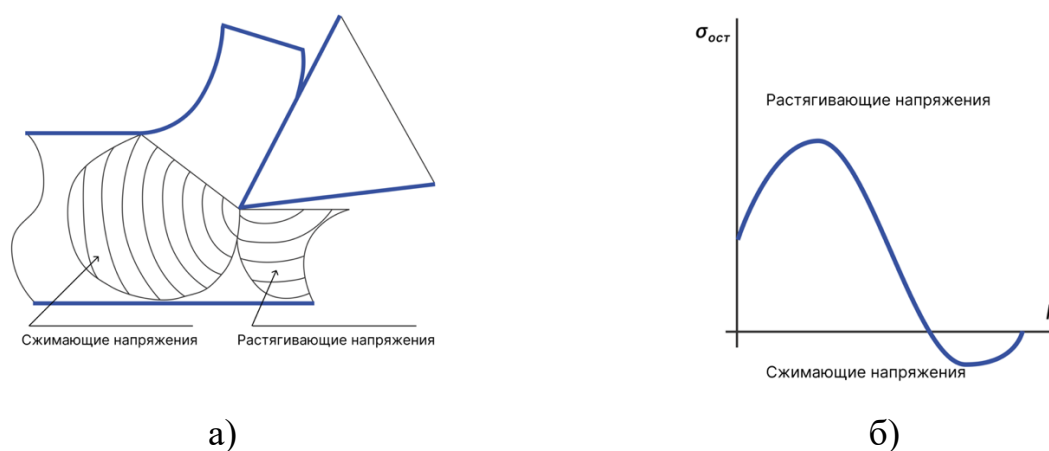


Рисунок 1.16 – Остаточные напряжения, получаемые в результате механической обработки: а) зоны возникновения остаточных напряжений; б) график распределения остаточных напряжений по глубине

На остаточные напряжения оказывает влияние величина подачи в процессе обработки изделия в совокупности со скоростью резания, состоянием и радиусом скругления режущей кромки, величиной радиуса округления вершины инструмента и механическими свойствами заготовки. Глубина залегания

образующихся остаточных напряжений предопределяется скоростью резания, толщиной срезаемого слоя и степенью износа режущего инструмента [100].

Проводимые исследования по точению термообработанных сталей с применением различных инструментов доказали отсутствие значительного влияния глубины резания на величину остаточных напряжений [10; 12; 19; 34; 50; 72]. В данных исследованиях в качестве основного критерия, оказывающего влияние на формирование остаточных напряжений, обозначают геометрию режущего инструмента. Геометрические параметры инструмента с разной долей интенсивности оказывают воздействие на распределение остаточных напряжений в поверхностном слое материала, но наибольшее влияние оказывает величина скругления режущей кромки. Проводимые исследования [35] продемонстрировали линейную зависимость между радиусом скругления режущей кромки и значениями остаточных напряжений. Так, например, минимальные значения остаточных напряжений достигаются при наименьшем скруглении режущей кромки.

Помимо режущей кромки на значение и характер остаточных напряжений оказывает передний угол инструмента (рисунок 1.17).

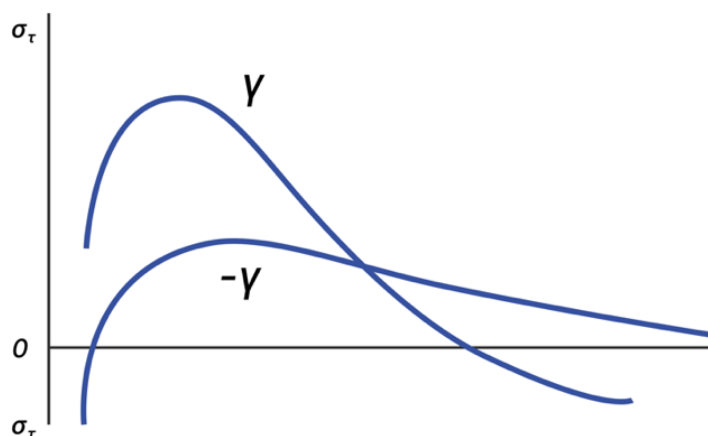


Рисунок 1.17 – Схематичное изображение влияния переднего угла реза γ на величину и глубину тангенциальных напряжений [108]

При обработке материала прослеживается зависимость радиуса при вершине реза и значение температуры в зоне резания. При возрастании радиуса с соблюдением постоянного значения скорости резания снижается температура в зоне обработки, при этом наблюдается относительно постоянное напряжение (рисунок 1.18).

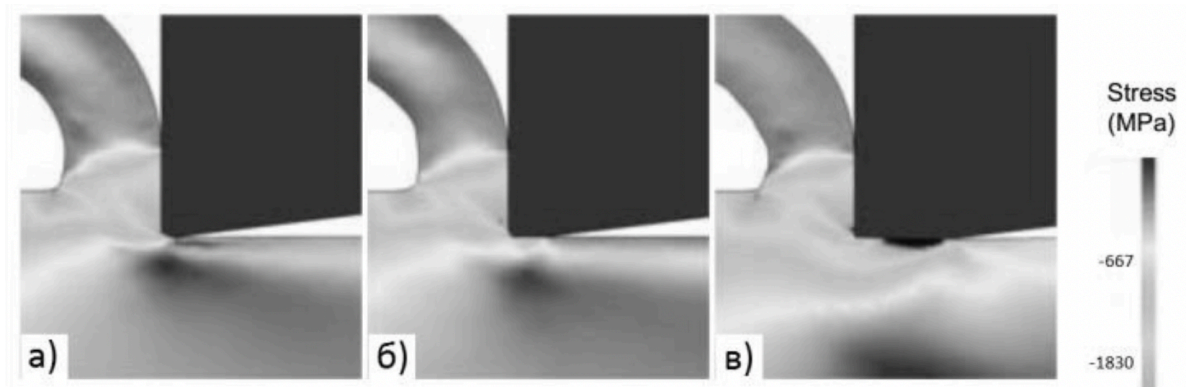


Рисунок 1.18 – Влияние износа режущей кромки инструмента на повышение и распределение остаточных напряжений: а) использование инструмента без износа, б) использование инструмента с износом 0,1 мм, в) использование инструмента с износом 0,3 мм [88]

В процессе эксплуатации инструмента увеличивается длина износа его режущей кромки. Параллельно с возрастанием износа режущей кромки происходит сдвиг остаточных напряжений до предела растяжения. При этом наблюдается возрастание глубины залегания остаточных напряжений на поверхности обрабатываемых изделий [77].

Неправильно подобранные параметры обработки изделия, которые не учитывают геометрию режущего инструмента, приводят к появлению наростов и преждевременному износу режущей кромки [7; 40]. При ограниченных технических параметрах токарного станка стоит уделять внимание подготовке режущего инструмента, а именно его режущей кромке.

Геометрия инструмента существенным образом влияет на появление остаточных напряжений, температуру в зоне резания и, как следствие, формирует качественную составляющую поверхностного слоя изделия.

1.4 Влияние режущей кромки инструмента на шероховатость поверхности изделий из хладостойких сталей

Режущий инструмент в процессе обработки изделий подвержен воздействию внутренних и внешних сил, которые оказывают влияния на быстрый износ режущих поверхностей инструмента, в том числе и режущей кромки, которая, как следствие, приводит к изменению первоначальных геометрических и режущих

параметров инструмента. Это оказывает прямое воздействие на отклонение от рекомендованных технических параметров использования инструмента, что в свою очередь выражается в непрогнозируемом снижении качества обрабатываемых изделий.

Среди таких изменений можно выделить:

1. Невозможность обеспечения режущим инструментом выполнения поставленных перед ним функций по достижению заданных качественных параметров обрабатываемого материала;
2. Увеличение силы резания и затрачиваемой мощности в процессе резания;
3. Снижение качества обрабатываемой поверхности изделия;
4. Сокращение периода работы инструмента, его стойкости и долговечности;
5. Повышение затрат на переточку инструмента, если это предусматривает инструмент, и замену его режущих элементов.

Требования, предъявляемые к режущему инструменту, зависят от его назначения и достигаемых параметров обрабатываемого материала. Технологические методы обеспечения данных требований также варьируются.

Особое влияние на процесс обработки материала оказывает геометрия режущего инструмента, которая повышает эффективность и производительность процесса резания. Правильная микрогеометрия режущего инструмента позволяет снизить силу резания, увеличить срок его службы и улучшить качество поверхности обрабатываемого материала [89; 111].

Среди геометрических параметров режущего инструмента стоит выделить его режущую кромку, которая описывается линией пересечения передней и задней поверхностей.

Сформированная геометрия режущей кромки инструмента, а также его состояние, оказывают значительное влияние на величину силы резания, процесс стружкообразования и другие свойства процесса обработки изделия. Исследованием процесса стружкообразования в зависимости от значения радиуса скругления режущей кромки инструмента занимались такие ученые, как Д.С.

Реченко [59], К. Рубенштейн [48], Ю.В. Виноградов [17], Д.К. Маргулис [37], С.В. Скороходов [66], Е.Н. Маслов [38], Г.И. Грановский [24] и другие.

Режущая кромка инструмента – это следствие пересечения передней и задней поверхностей, которое теоретически должно образовывать линию, контур которой определяется формой пересекающихся поверхностей и их взаимным расположением друг относительно друга.

На практике, линия, которая образует режущую кромку, имеет неправильную геометрическую форму и является переходной поверхностью.

При помощи современных методов заточки и доводки инструмента могут быть образованы различные формы переходной поверхности режущей кромки инструмента. Эти формы могут быть аппроксимированы различными способами.

Наиболее характерные формы, которые описывают геометрию режущей кромки, представлены на рисунке 1.19.

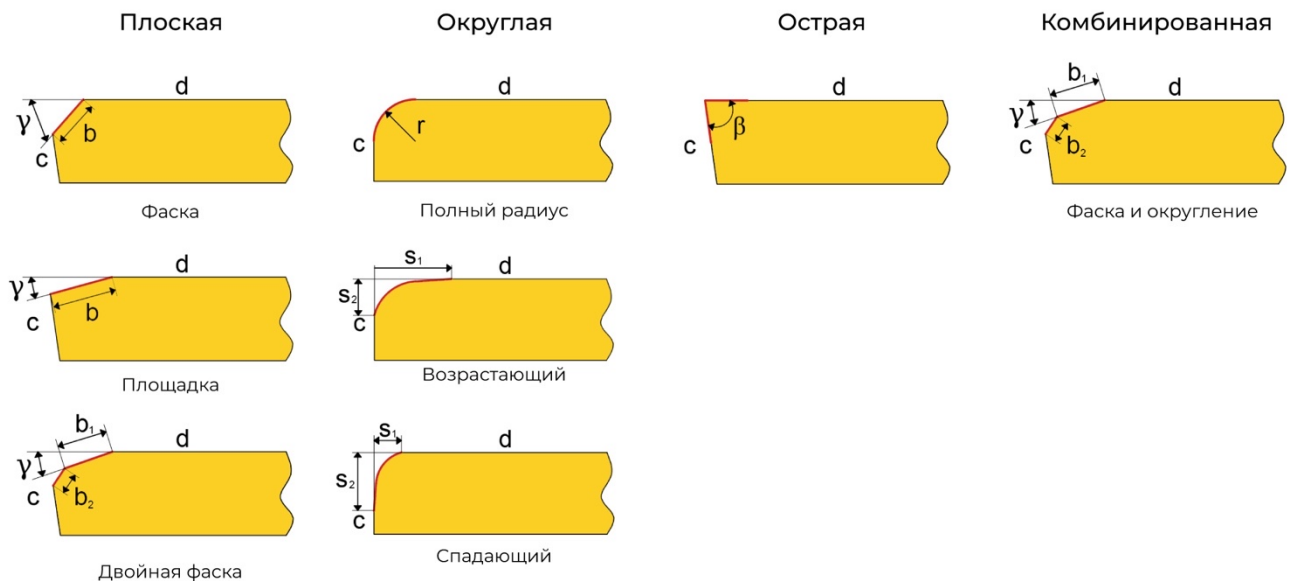


Рисунок 1.19 – Основные типы режущей кромки

В настоящее время поверхность режущей кромки аппроксимируют цилиндрической поверхностью, имеющей радиус ρ , который принято называть радиусом скругления режущей кромки. Данный радиус используют в качестве мезогеометрии инструмента.

Геометрические размеры переходной поверхности и радиус скругления режущей кромки ρ образуются в результате заточки инструмента. Величина

параметра ρ зависит от условий проведения процесса заточки и от шероховатости поверхностей d и c лезвия, которые образуют поверхность кромки резания (рисунок 1.20).

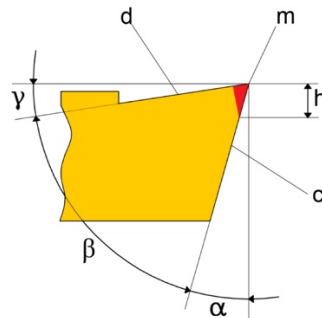


Рисунок 1.20 – Лезвие токарного резца с указанием кромки резания

Описать радиус скругления режущей кромки ρ можно по формуле (1.2) [10]:

$$\rho = R_{z\gamma} \times R_{z\alpha} \times e^{k_1 \times \sin \beta/2}. \quad (1.2)$$

В данной формуле углы γ , α и β определяют взаимное расположение поверхностей d и c лезвия, которые образуют режущую кромку m , а коэффициент k_1 отражает свойства материала лезвия.

Кромка m имеет собственную шероховатость в поперечном и продольном своих направлениях. Поперечная шероховатость – это результат сколов и вибраций, которые возникают в процессе заточки лезвия, а продольная – результат наложения друг на друга шероховатостей поверхностей d и c (рисунок 1.21).

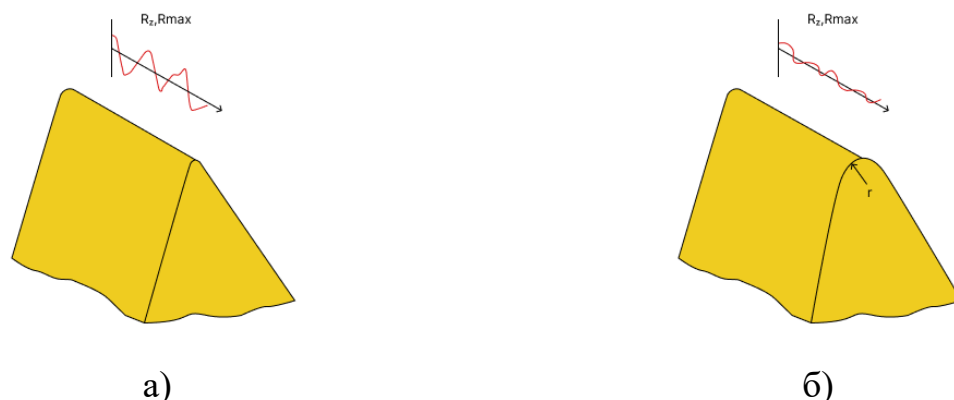


Рисунок 1.21 – Разница между острым инструментом (а) и инструментом с подготовленной кромкой (б)

На рисунке 1.22 представлены снимки режущей кромки инструмента с различной величиной скругления.

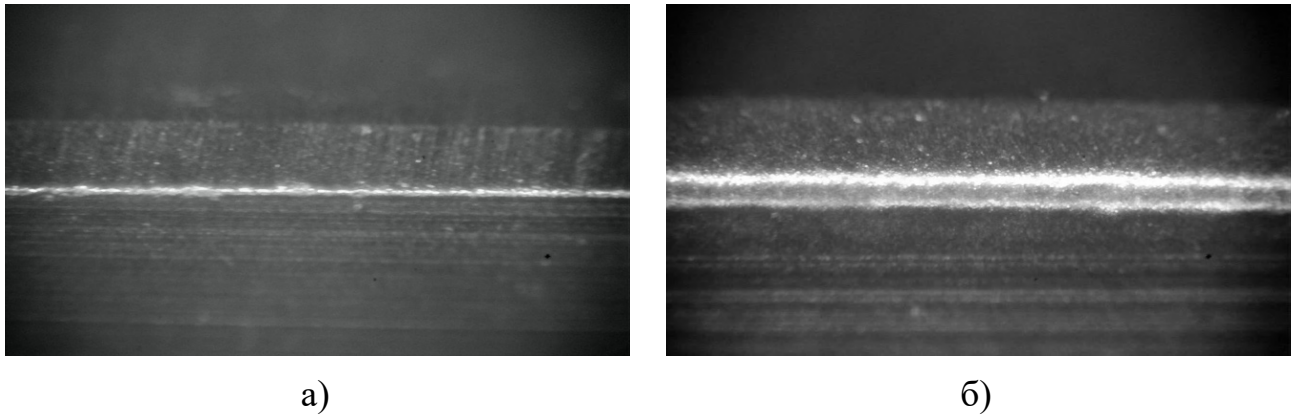


Рисунок 1.22 – Скругление режущей кромки ρ : а) инструмент с острой кромкой, б) инструмент со скругленной кромкой

Режущая кромка имеет определенный радиус, по причине невозможности изготовления идеально острого инструмента. Шероховатость на кромке инструмента выше, и поверхность этого инструмента может иметь дефекты. Дефектами могут быть: микродефекты (они возникают в процессе шлифования), а также дефекты, вызванные манипуляциями на каждом этапе производственного процесса [89; 100].

Подготовка режущей кромки может влиять на: гироскопический момент, силы резания, износ и срок службы инструмента, образование стружки, качество обрабатываемой поверхности, точность обработки и т.д. В процессе производства режущего инструмента необходимо учитывать влияние межпроцессной подготовки, а также влияние технологии обработки инструмента, поскольку именно эти факторы оказывают существенное влияние на срок службы инструмента [5].

Проводимые исследования показали, что радиус скругления режущей кромки ρ меняется на протяжении всей поверхности режущей кромки. Это позволяет нам рассматривать радиус ρ , только с точки зрения среднего радиуса скругления на всей ее протяженности. Анализ измерений радиуса скругления ρ на одной режущей кромке в трех разных точках А, В и С показал, что колебания величины радиуса могут достигать до 30% (рисунок 1.23).

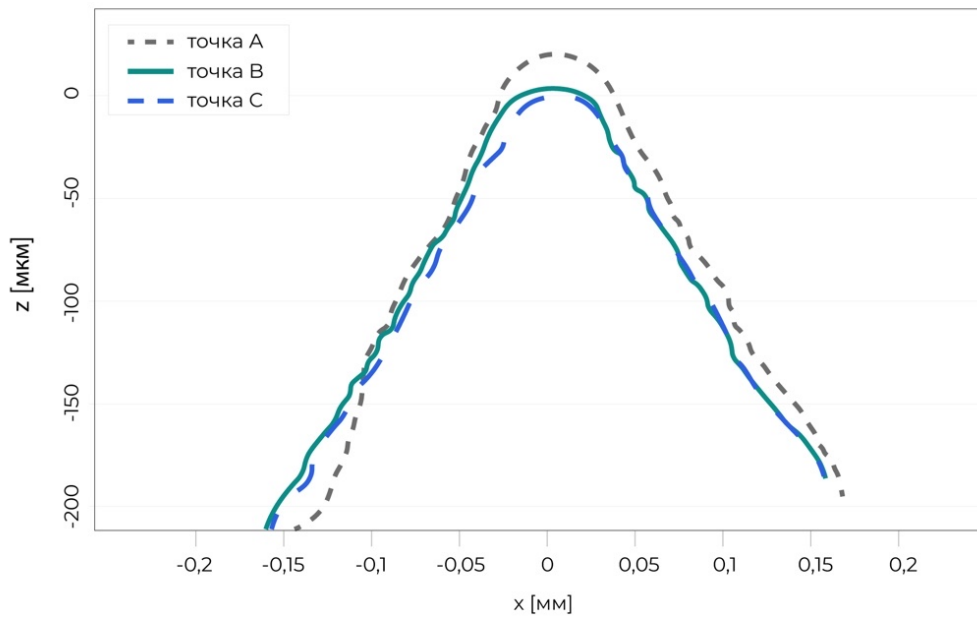


Рисунок 1.23 – Изменение радиуса скругления вдоль режущей кромки

Величина радиуса скругления режущей кромки в процессе работы инструмента меняется и приближается к стабилизированному значению, независимо от технологии заточки (рисунок 1.24).

На величину радиуса скругления режущей кромки оказывает влияние вид инструментального и обрабатываемого материалов, а также режим процесса резания. Для твердосплавного инструмента величина ρ находится в пределах 5-40 мкм [68].

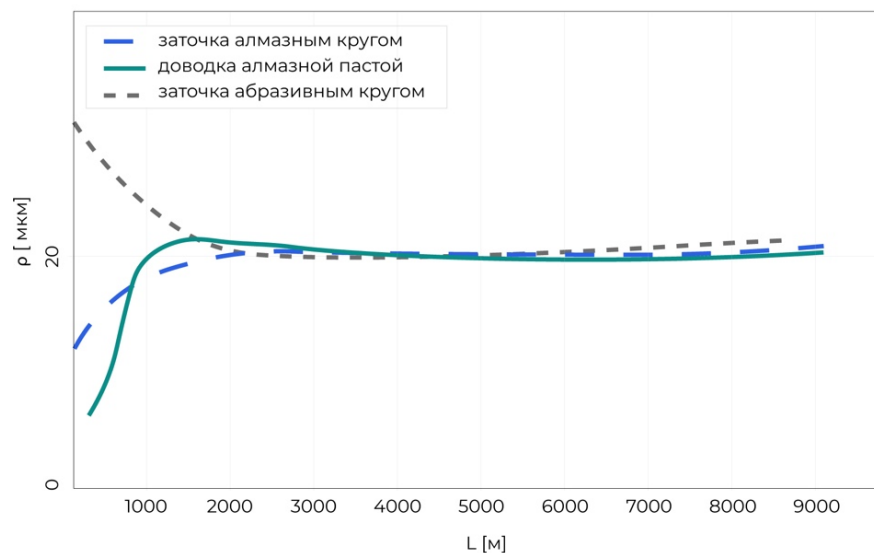


Рисунок 1.24 – Изменение величины радиуса скругления режущей кромки в течение резания

Процесс изменения радиуса скругления режущей кромки в течение его работы характеризуется периодичностью [108]. В начальный момент резания радиус скругления режущей кромки моментально увеличивается до 15-20 мкм. После этого процесс изменения радиуса ρ замедляется и стабилизируется, а процесс формирования площадки износа на главной задней поверхности сопровождается даже уменьшением радиуса скругления режущей кромки.

Параллельно с этим под действием высоких температур происходит снижение прочности криволинейной (радиусной) части режущего клина. Затем наступает момент, когда радиусная часть режущего лезвия теряет значительную величину прочности, что сопровождается ее катастрофическим износом.

В дальнейшем в результате удаления материала с главной задней поверхности процесс формирования величины ρ в процессе резания циклически повторяется.

На достижение минимального значения радиуса скругления режущей кромки влияет размер зерна инструмента [88].

Несмотря на то, что с увеличением размера зерна возрастает прочность твердого сплава на изгиб и увеличивается его способность сохранять острую режущую кромку, поверхность скругления режущей кромки в значительной мере определяют все-таки границы зерен, чем и объясняется увеличение ρ (при прочих равных условиях) с увеличением размера зерна (рисунок 1.25).

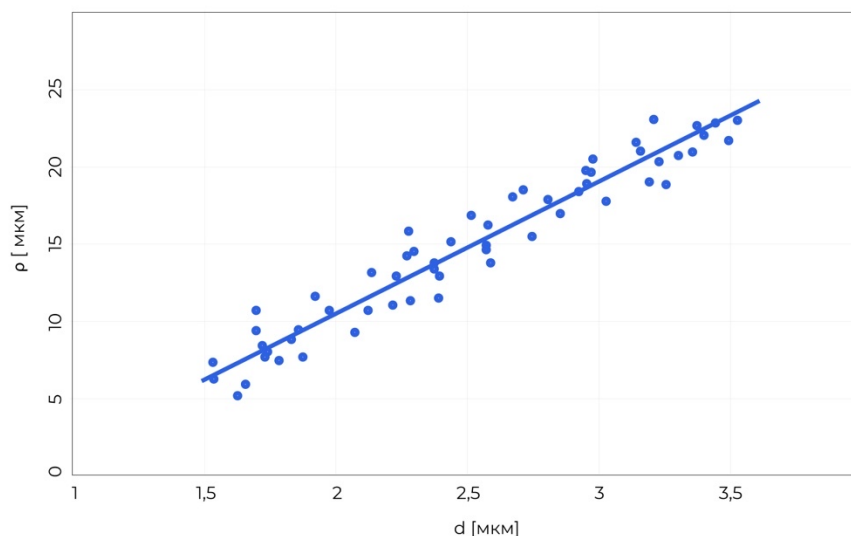


Рисунок 1.25 – Линейная зависимость минимально достижимого радиуса скругления режущей кромки от размера зерна

Радиус скругления режущей кромки ρ существенно влияет на износ и долговечность инструмента. Проводимые исследования показали следующую зависимость: при увеличении радиуса режущей кромки в допустимых значениях увеличивается и срок службы инструмента [77].

Исследования в данной области говорят о наиболее подходящем радиусе скругления режущей кромки, который находится в диапазоне от 20 до 40 мкм. Это достигается за счет компактной и гладкой поверхности режущей кромки; режущая кромка обладает более высокой прочностью и не имеет дефектов. Износ инструмента был в виде сколов режущих кромок для радиусов кромок $\rho = 5$ и 10 мкм и в виде равномерного износа инструмента для радиуса кромок $\rho = 25$ мкм [77].

В процессе резания наибольшему износу подвергается режущая кромка инструмента, которая приводит к последующему износу задней поверхности резца. При исследовании шероховатости была взята именно задняя поверхность резца, так как она наибольшим образом влияет на формирование шероховатости обрабатываемой поверхности.

Разница шероховатости поверхности в обрабатываемой и обработанной заготовке не должна иметь высокого значения, так как рассматриваемый процесс резания рассматривается в качестве альтернативной замены шлифовальной операции.

Наименьшая шероховатость обрабатываемой поверхности достигается при радиусе кромки $\rho = 25$ мкм, поскольку этот инструмент наиболее стабилен при обработке. Шероховатость обработанной поверхности для радиусов кромок $\rho = 5$ и 10 мкм уменьшается, а объем удаляемого материала остается прежним (рисунок 1.26)

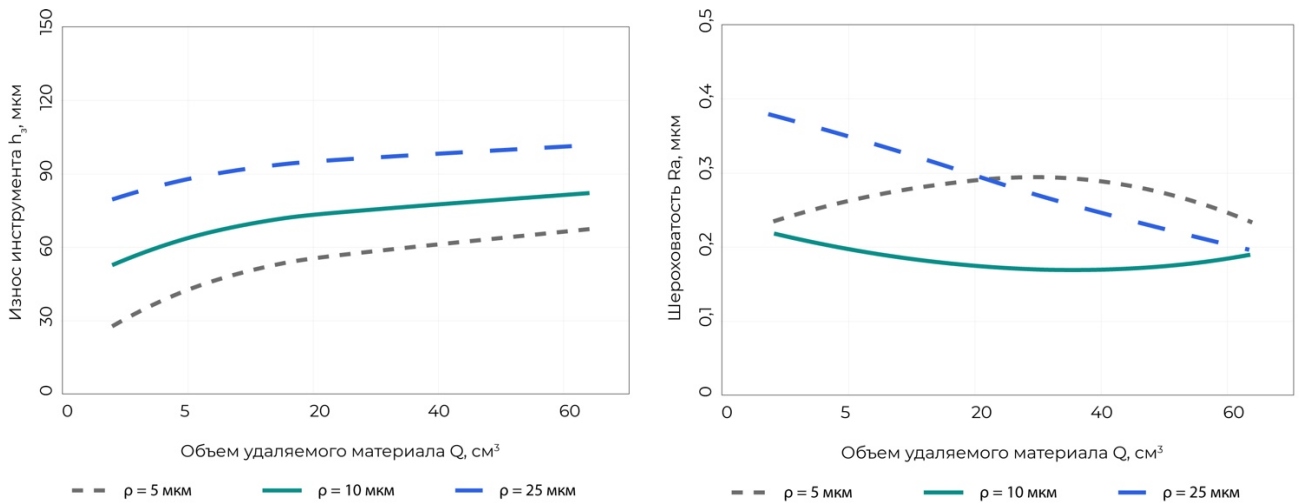


Рисунок 1.26 – Влияние радиуса режущей кромки на срок службы инструмента и шероховатость поверхности

В процессе механической обработки возникают силы резания P_x , P_y и P_z (рисунок 1.27).

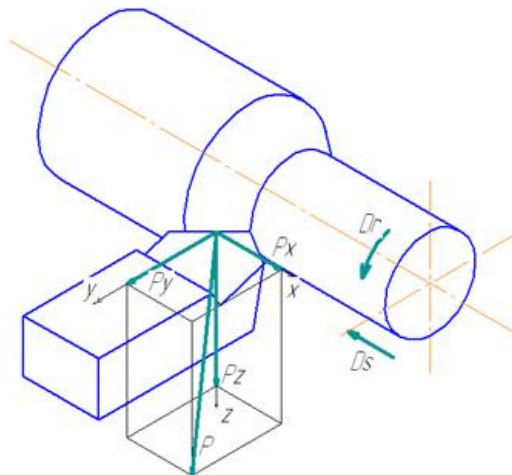


Рисунок 1.27 – Направления сил резания при токарной обработке

На рисунке 1.28 показано влияние скругления режущей кромки на общую силовую нагрузку R (диаграмма с левой стороны) и составляющую силы резания P_z (диаграмма с правой стороны). Общая силовая нагрузка была рассчитана исходя из формулы (1.3):

$$R = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}. \quad (1.3)$$

Силы резания увеличиваются с увеличением объема удаляемого материала (с увеличением износа инструмента). Чем меньше радиус кромки, тем выше общая силовая нагрузка R и составляющая силы резания P_z . Этот результат очень

интересен, потому что он должен быть обратным (чем меньше радиус кромки, тем меньше силы резания). Инструмент с радиусом кромки 5 мкм более острый, чем инструмент с радиусом кромки 25 мкм.

Более острый инструмент должен создавать меньшие силы резания, потому что такой инструмент легче входит в материал, но, когда мы смотрим на рисунок 1.28, можно увидеть ответ на этот вопрос. После удаления объема 6 см³ износ инструмента с радиусом кромки 5 мкм составляет почти 0,085 мм, а износ инструмента с радиусом кромки 15 мкм составляет около 0,035 мм, поэтому износ инструмента вызывает более высокие силы резания для инструмента с меньшим радиусом кромки.

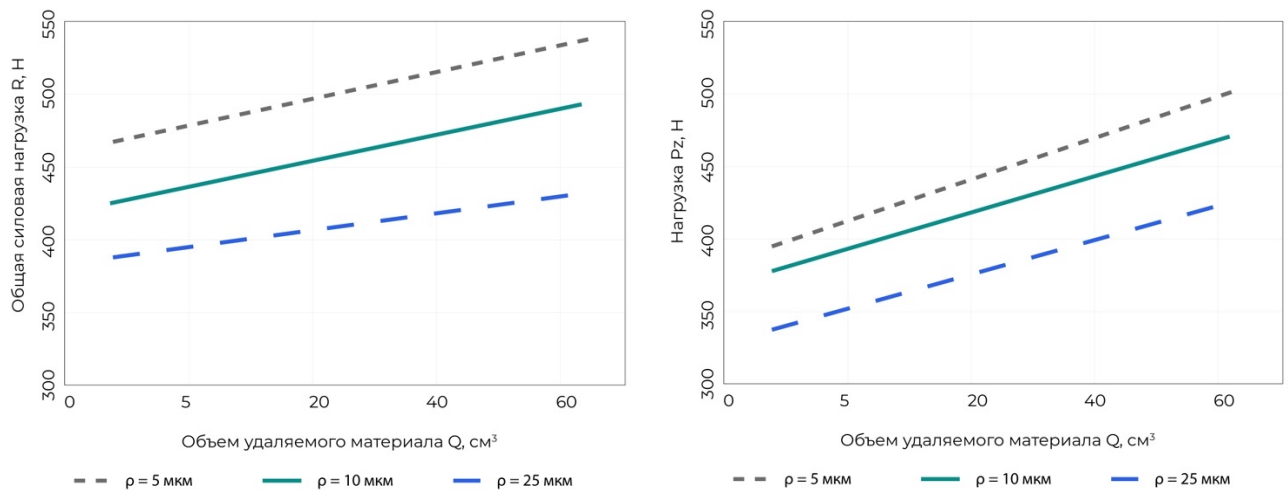


Рисунок 1.28 – Влияние радиуса режущей кромки на общую сумму сил резания R и на значение силы резания Pz

Состояние режущих кромок инструмента влияет на силу резания и затрачиваемую на него мощность, температуру резания, стойкость инструмента и качество обрабатываемой поверхности.

В общем случае, сила резания тем больше, чем меньше отношение a/ρ , где a – переменная толщина среза, а ρ – радиус скругления режущей кромки [32]. Однако чувствительность силы резания к ρ снижается в области устойчивого стружкообразования.

Корректируя параметры режима резания (подача, глубина резания) и величину ρ , можно добиться обеспечения процесса резания в выгодных условиях с обеспечением требуемого качества обрабатываемого изделия.

Несмотря на возрастание силы резания с увеличением ρ (уменьшением a/ρ), контактные напряжения и напряжения в режущем лезвии уменьшаются, увеличивая запас прочности лезвия. Такой прием упрочнения лезвий достаточно широко применяется на практике для различных инструментов, обеспечивая значительное увеличение стойкости [32].

Из этого можно сделать вывод о том, что радиус скругления режущей кромки инструмента оказывает существенное влияние на износостойкость инструмента (рисунок 1.29).

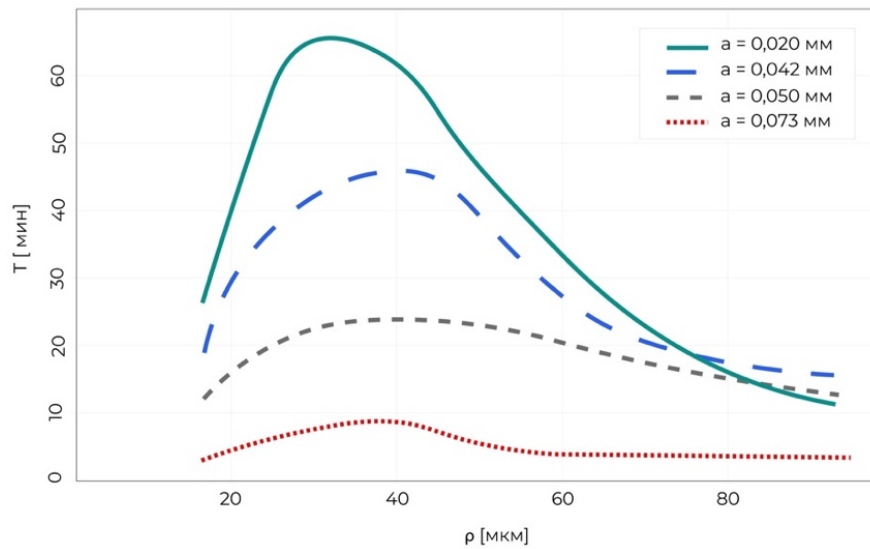


Рисунок 1.29 – Зависимость стойкости резцов от радиуса скругления режущей кромки

Исследования, проведенные на стальных пластинах марки 40Х2Н2МА, показали значительное влияние радиуса скругления кромки ρ на стойкость инструмента при значениях до 25-35 мкм.

В работе [94] при прямоугольном резании стали 40ХНМ экспериментально и теоретически доказано, что существует оптимальный радиус скругления режущей кромки, который обеспечивает минимум напряжений и наибольший ресурс лезвий.

Научные исследования, проведенные в данной области, позволяют утверждать о существовании оптимального радиуса скругления режущей кромки, который в настоящее время находится, в большинстве случаев, экспериментальным путем и зависит от марки режущего инструмента.

1.5 Способы подготовки режущей кромки инструмента

Проведенные исследования наглядно демонстрируют влияние режущей кромки на срок службы инструмента. На ресурс инструмента оказывают влияние не только геометрические параметры кромки резца, но и способ ее формирования.

Заточка – важный технологический этап работы с инструментом. При проведении заточки формируется его режущая кромка, которая непосредственно участвует в процессе резания. Поверхность кромки резания также имеет свою шероховатость. Проведенные исследования [92] продемонстрировали влияние пересекающихся поверхностей d и c (рисунок 1.20) на формирование продольной шероховатости кромки: чем меньше шероховатость пересекающихся поверхностей d и c , тем меньше продольная шероховатость кромки (рисунок 1.30).

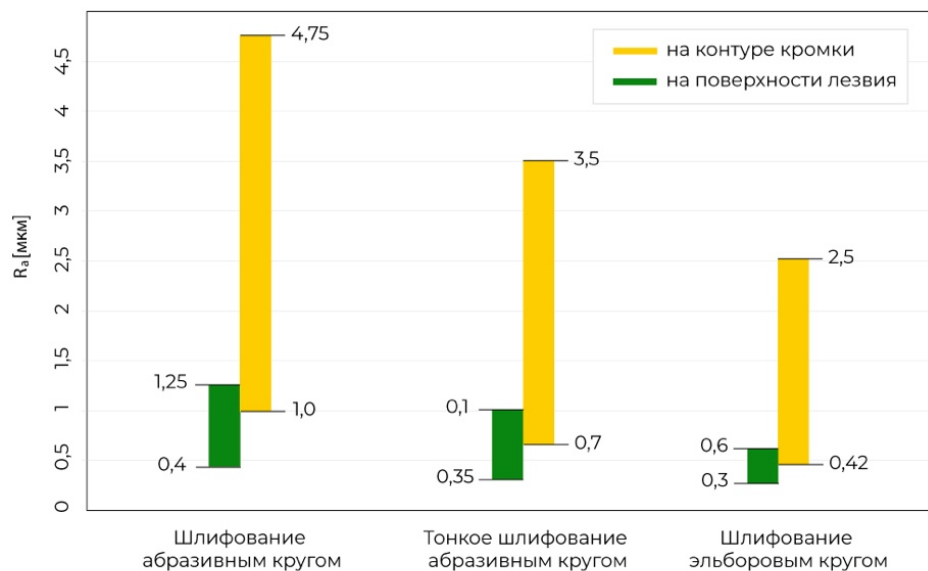


Рисунок 1.30 – Влияние способа заточки на формирование продольной шероховатости режущей кромки инструмента

Метод шлифования, используемый при заточке инструмента, повышает продольную шероховатость кромок от 1,5 до 2,5 раз относительно поверхностей d и c .

Тепловые явления, возникающие при шлифовании, оказывают существенное влияние на формирование поверхностного слоя инструмента (рисунок 1.31). Высокие контактные температуры при шлифовании приводят к появлению шлифовочных трещин и прижогов на обработанной поверхности режущего

инструмента. Термическое воздействие является причиной прочностных и структурных изменений. Нагрев инструмента при шлифовании вызывает тепловое деформирование, что непосредственно сказывается на его геометрической точности.

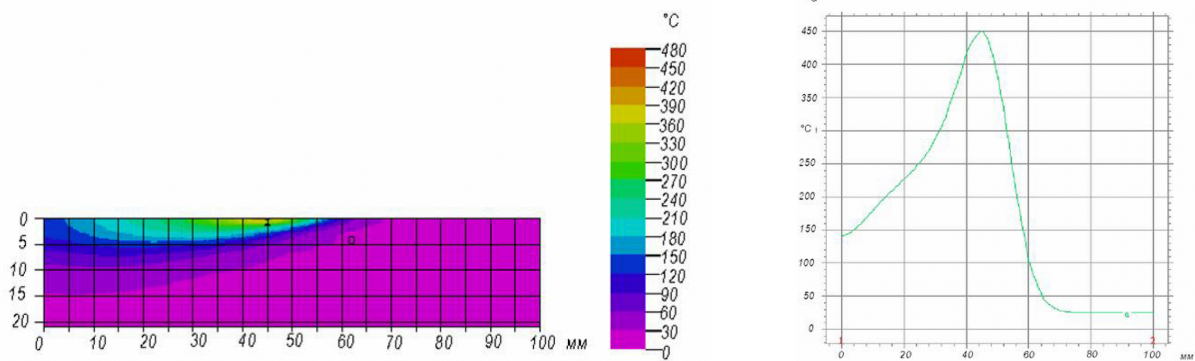


Рисунок 1.31 – Температура на поверхности инструмента при шлифовании абразивным кругом со скоростью резания 45 м/сек.

В большинстве случаев процесс шлифования режущей кромки повышает ее шероховатость, что негативно сказывается на стойкости инструмента. В первую очередь в процессе резания начинают разрушаться выступы микронеровностей на кромках по причине малой механической прочности. Впадины микронеровностей – это место зарождения микротрещин, число которых увеличивается в процессе резания, что в конечном итоге приводит к появлению сколов.

Процесс разрушения механически слабой кромки, полученной в процессе шлифования, на начальном этапе резания происходит неуправляемо и приводит к непредсказуемым изменениям ее формы.

Воздействие абразивных частиц может привести к увеличению сколов на кромке или может привести к удалению карбидов из области режущей кромки [96]. Поэтому необходима дальнейшая подготовка режущей кромки, чтобы избежать неровностей на кромке и увеличить срок службы инструмента. Этот дополнительный процесс изменяет поверхностные и подповерхностные свойства вблизи края влияет на адгезионные и когезионные свойства покрытия.

Рассмотренные алгоритмы повышения качества поверхности режущего инструмента позволили выявить ряд приоритетных методов его предварительной подготовки.

Наибольшее распространение на практике приобрели абразивно-отделочные методы, к которым можно отнести тонкое шлифование, полирование и хонингование. Данные методы, в некоторых случаях, способны уменьшить значение шероховатости поверхности за счет срезания неровностей и выступов. Однако при использовании абразивно-отделочных методов шаговые параметры остаются без изменения по причине невозможности их заполнения металлом. Вследствие чего несущая способность поверхности изделия не изменяется, что является негативным фактором, влияющим на износостойкость и жесткость. Так, например, при магнитно-абразивной обработке глубина и степень упрочнения материала намного выше, чем при стандартных абразивно-отделочных методах. Также при обработке методами данной группы возникает высокий нагрев поверхности изделия в процессе его обработки, в результате которого формируются положительные остаточные напряжения [106].

К следующей группе поверхностно-пластического деформирования относятся такие методы, как алмазное выглаживание, дорнование, чеканка, галтовка, дробеструйная обработка, алмазное выглаживание и другие. Данная группа методов также обладает рядом негативных последствий, которые сказываются на качестве обработки поверхности.

Среди современных методов можно выделить электроконтактную обработку металла, которая осуществляется при помощи нагрева обрабатываемой поверхности электродом-инструментом с последующим выведением мягкого металла из зоны обработки. Данный метод подходит не для всех металлов, а также характеризуется невысокой точностью и низким качеством обрабатываемой поверхности. Основным преимуществом электроконтактной обработки принято считать высокую производительность процесса за счет снятия относительно большого объема металла с поверхности заготовки.

Изменение задней поверхности инструмента в процессе обработки представлено на рисунке 1.32

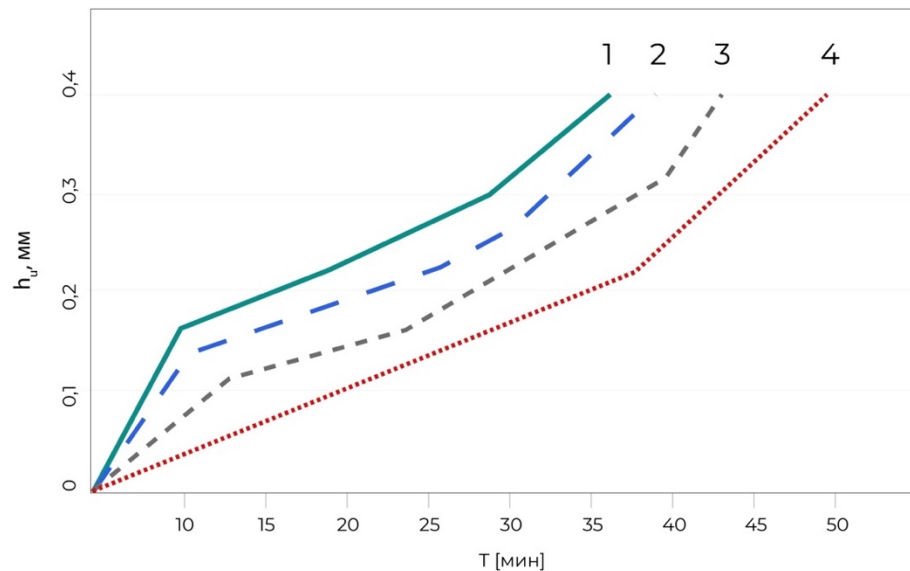


Рисунок 1.32 – Изменение задней поверхности инструмента в процессе обработки с течением времени по параметру $h_{и}$, где: 1) метод предварительного пластического деформирования; 2) метод электроконтактного нагрева; 3) низкотемпературный метод; 4) традиционный процесс механической обработки [5; 42; 64; 94; 107]

При последующей доводке кромок режущих инструментов методами объемной абразивной обработки [94], шероховатость на поверхностях лезвия и на кромке в продольном и поперечном направлениях оказывается одинаковой (рисунок 1.33).

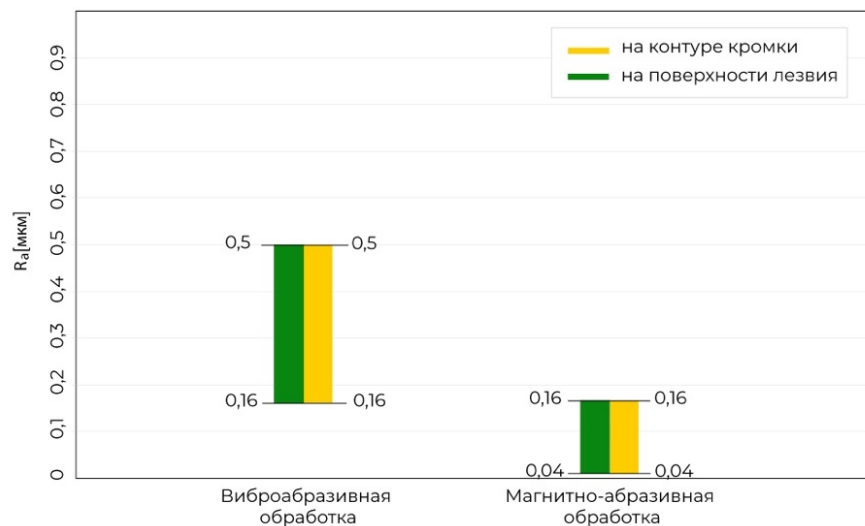


Рисунок 1.33 – Влияние доводки на продольную шероховатости режущей кромки инструмента

Сравнивая износ лезвия при заточке и при последующей доводке методом магнитно-абразивной обработки, можно отметить, что в последнем случае стойкость инструмента увеличивается (рисунок 1.34). Это свидетельствует о применимости метода магнитно-абразивной обработки для упрочнения и заточки инструментов.

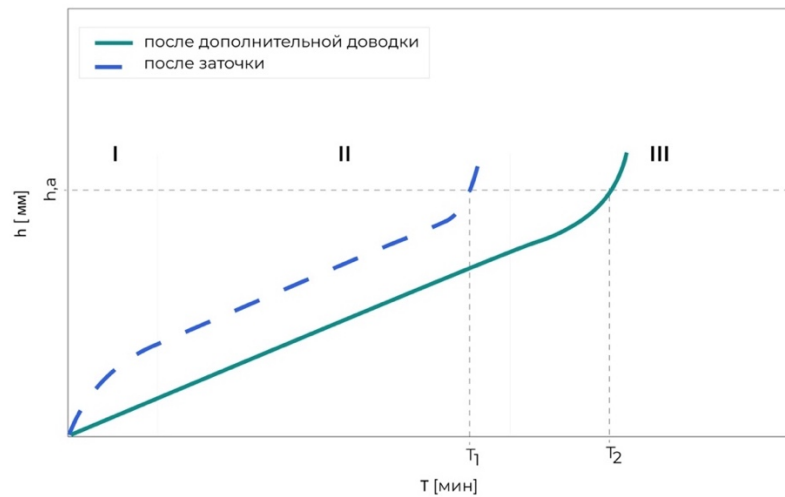


Рисунок 1.34 – Графики износа лезвий после заточки и после дополнительной доводки режущей кромки инструмента магнитно-абразивным методом

На графике выделяют три этапа износа: I – этап начального повышенного износа, II – этап нормального износа, III – этап катастрофического износа.

Из анализа этапа I можно сделать вывод о низкой прочности острой режущей кромки после заточки. Если высота допустимой фаски износа становится равной h_a , то стойкость инструмента станет соответствовать времени T_1 . Время стойкости инструмента возможно увеличить до значения T_2 с помощью нивелирования проблем острой кромки до начала процесса резания методом магнитно-абразивной обработки.

Проведенный анализ свидетельствует о возможности повышения времени работоспособности инструмента за счет доводки режущих кромок инструмента методом магнитно-абразивной обработки. Это позволяет сформировать одинаковую продольную шероховатость на всем протяжении режущей кромки и предпочтительный радиус скругления ρ . Это обеспечит повышенную прочность кромки с сохранением ее геометрической формы и, как следствие, увеличит стойкость инструмента.

Сохранение геометрии режущей кромки инструмента за счет увеличения ее стойкости, позволяет достичь одинаково прогнозируемого качества обработки изделия с возможностью достижения заданных параметров точности и шероховатости.

Требуемый радиус скругления режущей кромки ρ создается сочетанием скорости и продолжительности абразивного движения и обрабатываемой детали. Целью подготовки режущей кромки является: повышение прочности режущей кромки, увеличение срока службы инструмента, уменьшение внутреннего напряжения покрытия, снижение риска сколов кромки, создание определенной формы и размера режущего края. Предварительная подготовка режущей кромки инструмента также положительно сказывается и на качестве обработки прецизионных поверхностей изделий из хладостойких сталей, а в частности при обработке штока гидроцилиндра из стали 40Х2Н2МА.

В проводимых исследованиях в качестве инструмента, имеющего большой потенциал использования и способного обеспечить требуемое качество прецизионных поверхностей изделий из хладостойких сталей на операции чистового точения, выбраны керамические режущие пластины марки ВОК-60.

1.6 Выводы по первой главе

Проведенный анализ позволил сделать следующие выводы, сформировать цель и поставить задачи исследования:

1. Изделия из хладостойкой стали широко распространены в горнодобывающей технике, работающей в условиях климатически низких температур, так как обладают отличительными эксплуатационными и технологическими свойствами, увеличивающие предел хладноломкости и износостойкости узлов и деталей;

2. Хладостойкие стали применяют при изготовлении штоков силовых гидроцилиндров, чтобы частично решить проблемы поломок, связанных с режимом работы оборудования в условиях климатического холода;

3. Типовой технологический процесс изготовления штоков гидроцилиндров включает финальную круглошлифовальную операцию, которая

характеризуется рядом негативных последствий: шаржирование поверхности абразивными частицами, возникновение усталостной прочности и снижение износостойкость изделия;

4. В качестве альтернативы финишной шлифовальной операции изготовления штока гидроцилиндра рассмотрена возможность использования операции чистового точения, которая требует использования предварительно подготовленного режущего инструмента;

5. Подготовка режущего инструмента включает в себя формирование правильной геометрии режущей кромки, снижение шероховатости передней и задней поверхностей инструмента, а также удаление дефектов предыдущей обработки;

6. Применение магнитно-абразивной обработки позволяет сформировать оптимальный микропрофиль режущей кромки инструмента, значительно снизить величину шероховатости поверхности, полностью удалить дефектный слой без негативного высокотемпературного воздействия и химических реакций на поверхность изделия.

Цели и задачи исследования

Целью работы является разработка метода технологического обеспечения повышения качества прецизионных поверхностей изделий из хладостойких сталей за счет использования инструмента на основе режущей керамики с измененной геометрией режущей кромки и уменьшенной шероховатостью передней и задней поверхностей, предварительно достигнутой способом магнитно-абразивной обработки.

Идея работы заключается в технологическом обеспечении качества прецизионных поверхностей изделий из хладостойкой стали при их обработке режущим инструментом, оснащенным сменными многогранными керамическими пластинами, предварительно подготовленными магнитно-абразивным методом и характеризующимися низкой шероховатостью передней и задней поверхностей, а также определенным радиусом скругления режущей кромки инструмента.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается решением нижеуказанных задач:

1. Провести анализ и обобщить теоретические и экспериментальные данные, приведенные в литературных источниках, зависимости качества обработки прецизионных изделий из хладостойких сталей от технологических характеристик и геометрических параметров режущего инструмента;

2. Разработать способ магнитно-абразивной обработки режущих кромок и рабочих поверхностей инструмента, включающий обоснование выбора схемы обработки, рабочих движений, режимных параметров и состава технологической среды;

3. Экспериментально определить влияние технологических параметров магнитно-абразивной обработки на шероховатость поверхностей инструмента, радиус скругления режущей кромки и удельный съём материала с единицы площади;

4. Разработать регрессионные математические зависимости технологической системы, учитывающие влияние технологических параметров магнитно-абразивной обработки на шероховатость поверхностей инструмента, радиус скругления режущей кромки и удельный съём материала с единицы площади при обработке инструмента на основе режущей керамики марки ВОК-60;

5. Установить зависимость влияния значений шероховатости поверхности и радиуса скругления режущей кромки инструмента марки ВОК-60, подготовленного методом магнитно-абразивной обработки с различными технологическими параметрами, на качество и дефектность изделий из хладостойкой стали;

6. Предложить практические рекомендации по выбору значений технологических параметров магнитно-абразивной обработки, обеспечивающих формирование геометрических параметров режущего инструмента марки ВОК-60 и позволяющих обеспечить высокое технологическое качество прецизионных поверхностей изделий из хладостойких сталей, снизить их шероховатость и повысить сопротивление хрупкому излому.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ КЕРАМИЧЕСКИХ РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН МЕТОДОМ МАГНИТНО- АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

2.1 Технология формирования радиуса скругления режущих кромок и шероховатости поверхностей керамических режущих пластин методом магнитно-абразивной обработки

Процесс магнитно-абразивной обработки объединяет группу технологических процессов, которые характеризуются использованием абразивной рабочей среды в магнитном поле. Принцип магнитно-абразивной обработки заключается в обработке поверхности ферроабразивной массой, которая уплотняется за счет энергии электромагнитного поля. При обработке заготовки наблюдаются два параллельно протекающих явления: микрорезание и полирование металла [84].

В качестве рабочей среды применяют ферромагнитный абразивный порошок, которым заполняют рабочую зону обработки. Под действием сил электромагнитного поля формируется абразивная «щетка», которая не имеет жесткой связи между частицами, делая процесс магнитно-абразивной обработки подходящим для различных конфигураций изделий без использования вспомогательных приспособлений.

Магнитно-абразивным способом можно обрабатывать поверхности: плоские, тела вращения, цилиндрические внутренние и наружные, винтовые, с трапециевидным, эвольвентным и другим профилем [80].

Метод магнитно-абразивной обработки широко зарекомендовал себя при обработке и доводке режущего инструмента. Особенностью данного процесса является небольшой удельный вес пластической деформации материала, а также высокая твердость абразивных зерен, превышающая твердость материала в 1,5 и более раз [82; 103], относительно небольшие радиусы округления абразивных зерен и высокие удельные давления.

Преимуществом магнитно-абразивной обработки, которое позволяет применять данный метод для решения широкого спектра технологических задач,

является то, что при помощи магнитного поля происходит силовое нагружение абразивного элемента [3; 8; 25; 27; 31; 46]. С помощью применения данного метода можно механизировать процессы удаления дефектов предыдущей обработки, заусенцев, окалин, тонких оксидных пленок, полирования изделий, снижения шероховатости поверхностей и скругления острых кромок [8; 23].

Регулирование плотности среды и ее давления на обрабатываемую поверхность выполняется изменением величины магнитного потока, позволяя регулировать величину прижима магнитно-абразивного порошка к обрабатываемой поверхности, осуществляя постоянное перераспределение абразивных зерен в рабочем пространстве в процессе магнитно-абразивной обработки, формируя большую контактную площадь ферромагнитного порошка с обрабатываемой поверхностью, нивелировать жесткость сцепки между абразивными зернами, что позволяет решать большой спектр разнообразных технологических задач в сравнении с традиционными способами абразивной обработки [4; 46; 61; 85; 87].

При магнитно-абразивной обработке порошок с определенной заданной силой прилегает к поверхности обрабатываемой заготовки и при ее движении в рабочем пространстве между полюсными наконечниками производится массовое микрорезание (диспергирование металла) ферромагнитными абразивными частицами [8], а также упруго-пластическое деформирование (выглаживание) поверхностного слоя [60]. Протекающие адсорбционные и химические процессы при магнитно-абразивной обработке усиливают диспергирование и выглаживание поверхностного слоя [78].

Охрупчивание приповерхностного слоя происходит в зоне обработки и является результатом перенаклепа металла в микрообъеме. Повышенный износ металла вызывается микроцарапинами, возникающими при микрорезании.

В результате процесса резания и сил трения в этих микрообъемах металла возникают растягивающие напряжения и динамически образуются микротрещины [13]. Вновь образовавшаяся после резания поверхность металла, наличие растягивающих напряжений на обработанной поверхности и образовавшиеся

микротрещины способствуют благоприятному развитию адсорбционного эффекта [16,104].

При обработке магнитно-абразивный инструмент обладает эластичностью за счет нежесткой связки ферроабразивных частиц между собой, что влияет на снижение температуры непосредственно в зоне резания. Магнитно-абразивный метод обработки можно характеризовать как холодный.

Температура в зоне микрорезания при магнитно-абразивной обработке ферромагнитных материалов менее 150°C , при использовании смазочно-охлаждающей жидкости она снижается до $30\text{-}40^{\circ}\text{C}$ [8; 36]. В процессе обработки нагревание заготовки происходит под действием силы резания и сил намагничивания. Температура в рабочей зоне резания не превышает 100°C при обработке немагнитных материалов даже без применения смазочно-охлаждающей жидкости. Это объясняется отсутствием влияния намагничивания обрабатываемого изделия.

Магнитная «щетка», формируемая ферроабразивными зернами под действием магнитного поля, оказывает удельное давление на заготовку много меньше в сравнении с традиционными методами [8; 97; 98; 102; 105]. Давление магнитно-абразивного инструмента на обрабатываемую поверхность определяет силовую динамику процесса и влияет на интенсивность снятия материала, температуру резания и формирование качества поверхностного слоя изделия [60].

Особенность протекания магнитно-абразивной обработки, характеризуемая сочетанием физико-химических явлений, положительно влияет на интенсификацию процессов диспергирования поверхностного слоя и полирования обрабатываемой поверхности изделия [79].

2.2 Способ магнитно-абразивной обработки керамических режущих пластин

В настоящее время существует более 200 способов и устройств для воспроизведения процесса магнитно-абразивной обработки, правильный выбор которых определяет успешность протекания процесса формирования поверхностного слоя и геометрических параметров заготовки.

При выборе и разработке способа магнитно-абразивной обработки керамических режущих пластин следует обеспечить равномерность процесса микрорезания во избежание изменения размерных параметров пластин [51]. Особое внимание следует уделить равномерному воздействию магнитно-абразивного инструмента вдоль всей режущей кромки обрабатываемой пластины во избежание формирования скачкообразного профиля скругления режущей кромки. Это является критически важным параметром, оказывающим прямое влияние на износостойкость керамических пластин, используемых в дальнейшем в качестве режущего инструмента, а также на обеспечение технологического качества обработки прецизионных поверхностей изделий из хладостойких сталей [103].

2.2.1 Схема магнитно-абразивной обработки режущих пластин

Для реализации технологического процесса обработки керамических режущих пластин прямоугольной формы была выбрана схема магнитно-абразивной обработки, имеющая условное обозначение I-AB-1 (рисунок 2.1) [80].

В данном случае I – указывает на принадлежность схемы к определенной группе, в которой магнитное поле формирует из порошковой ферромагнитной массы режущий инструмент с управляемой жесткостью и создает силы резания. В данной схеме реализуется действие постоянного магнитного поля в зоне абразивного резания, изменение под его воздействием механических характеристик обрабатываемого металла и активизация химико-физических явлений, способствующих интенсификации резания и полирования [93].

Сочетание АВ свидетельствует о полировании наружных поверхностей заготовки линейной формы посредством ее вращения вокруг своей оси. Обозначение 1 в коде схемы магнитно-абразивного полирования показывает о применении электромагнитного индуктора постоянного тока.

Магнитно-абразивный порошок, находящийся в рабочем пространстве $l_{рп}$, удерживается в нем и, оказываясь прижатым к обрабатываемой поверхности заготовки при движении относительно индуктора (или наоборот), осуществляет процесс обработки [97]. При данном процессе формируется поверхность заготовки

с новым микрорельефом и удаляется припуск [101]. Обработанная заготовка имеет измененные физико-химические свойства приповерхностного слоя.

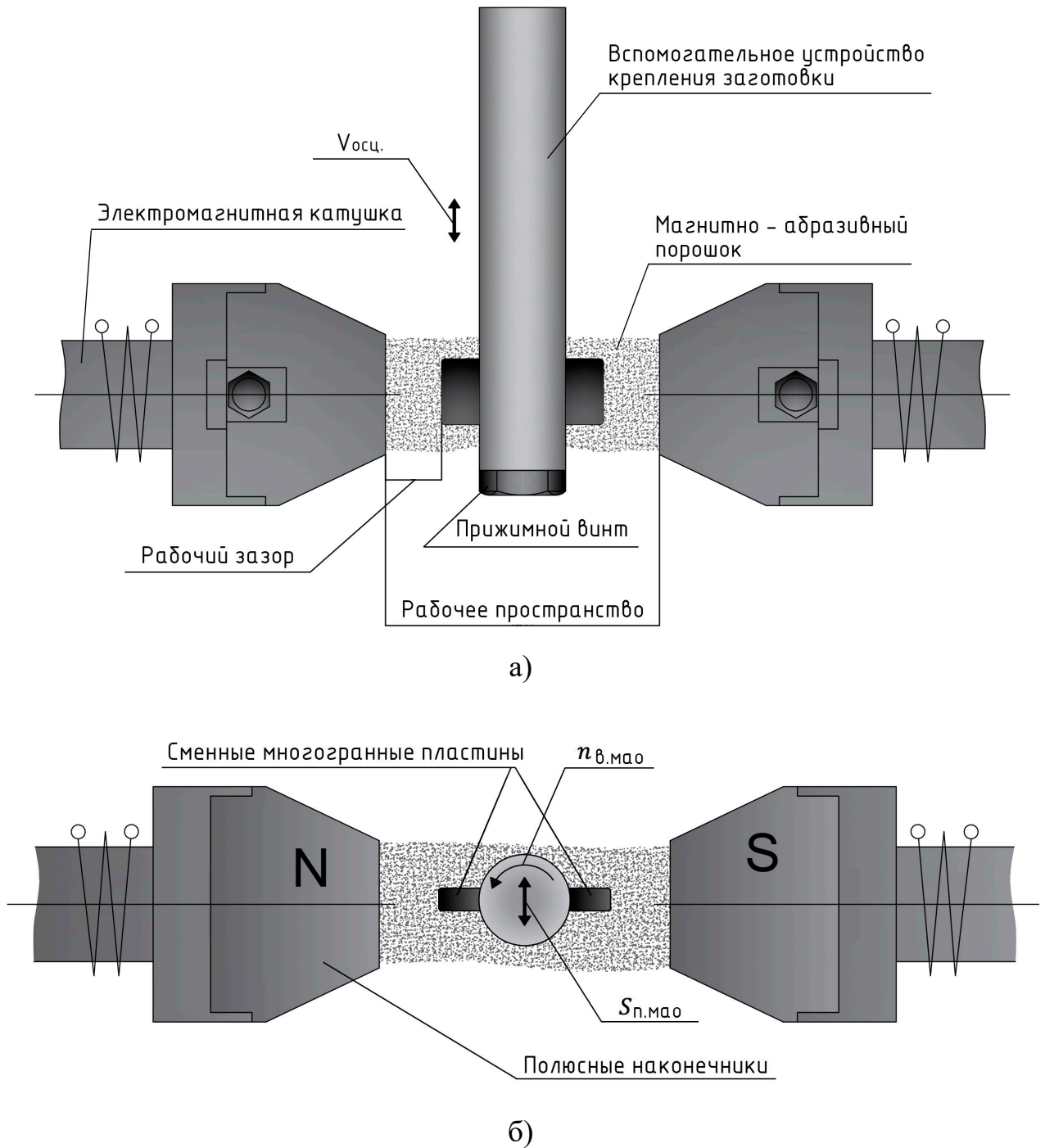


Рисунок 2.1 – Схема магнитно-абразивной обработки сменных многогранных пластин (а – вид сбоку, б – вид снизу), где: $n_{в.мао}$ – частота вращения, $S_{п.мао}$ – величина продольной подачи, $V_{осц.мао}$ – скорость осцилляции

2.2.2 Выбор сочетания рабочих движений при обработке режущих пластин

Движение заготовки, состоящей из вспомогательного устройства крепления режущих пластин и самих пластин, в рабочем пространстве описывают следующие величины: частота вращения ($n_{в.мао}$), продольная подача ($S_{п.мао}$) и скорость осцилляции ($V_{осц.мао}$).

Скорость абсолютного движения зерен абразивного материала (V_3), по данным В.И. Ждановича [27], значительно меньше скорости ($V_{пов}$) движения обрабатываемой поверхности. В случае $V_{пов} = 0,6-2,1$ м/с скорость абсолютного движения зерен вдоль дуги рабочего зазора $V_3 = 0,01-0,02$ м/с. Взяв полученный результат за основу, можно принять, что скорость резания примерно равна скорости движения заготовки: $V_p = V_{пов} - V_3 \approx V_{пов}$.

Влияние сочетания рабочих движений на формирование качественных характеристик поверхностного слоя и производительность процесса магнитно-абразивной обработки представлены в работах [4; 62; 71]. Выбранная схема магнитно-абразивной обработки описывается неподвижным состоянием ферроабразивной массы, в которой рабочие движения совершаются непосредственно заготовкой (рисунок 2.2).

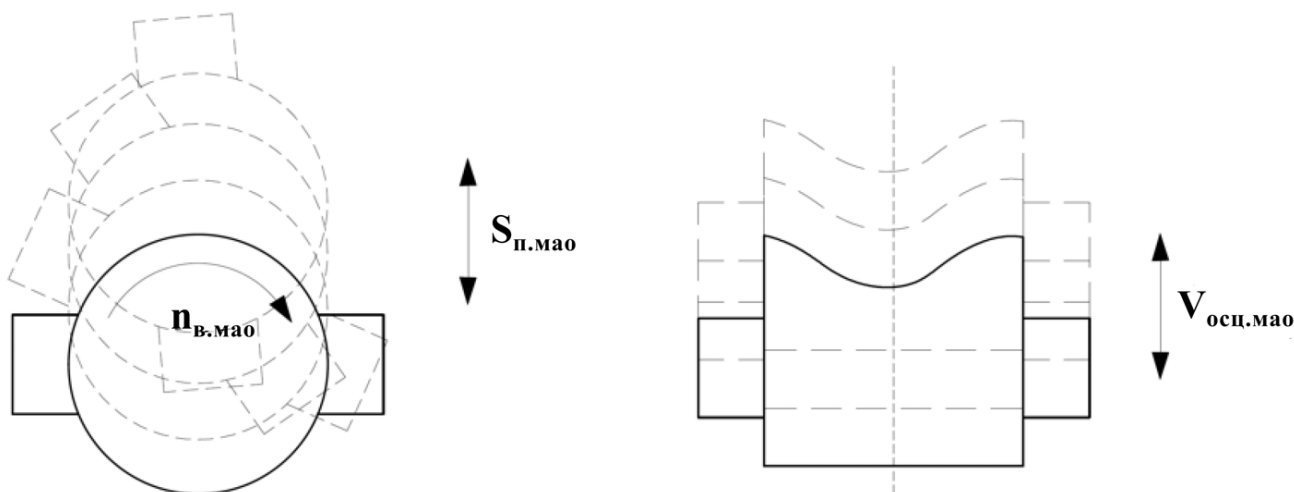


Рисунок 2.2 – Движение заготовки при магнитно-абразивной обработке

Подбор сочетаний движений при магнитно-абразивной обработке обеспечивает перемешивание частиц в рабочем зазоре и влияет на интенсивность проведения процесса, о чем свидетельствует объем снятия материала с поверхности заготовки.

Выбор сочетаний рабочих движений следует определять индивидуально в зависимости от поставленной научно-технической задачи [71]. Главным критерием подбора эффективного сочетания движений при магнитно-абразивной обработке является показатель, который характеризует интенсивность снятия материала с единицы площади в зависимости от продолжительности обработки. Внимание также обращают и на качественные характеристики обработанного изделия.

Проводимые исследования [8; 60] по определению влияния сочетаний рабочих движений при магнитно-абразивной обработке показывают эффективность применения двух движений. Эффективность проявляется в объеме снимаемого материала с поверхности заготовки, которая увеличивается до 2-3 раз по сравнению с применением одного движения. Это объясняется высокой интенсивностью перемешивания ферроабразивного порошка и, как следствие, участием большего числа зерен в процессе микрорезания. Из этого можно предположить, что сочетание трех рабочих движений будет также сопровождаться увеличением производительности обработки.

Проводимые исследования установили зависимость влияния сочетания движений заготовки на шероховатость поверхности R_a , величину скругления режущей кромки ρ и удельный съем материала с единицы площади q . В работе были исследованы следующие сочетания движений:

1 – сочетание частоты вращения, величины продольной подачи и скорости осцилляции ($n_{в.мао} + S_{п.мао} + V_{осц.мао}$);

2 – сочетание частоты вращения и величины продольной подачи ($n_{в.мао} + S_{п.мао}$);

3 – сочетание частоты вращения и скорости осцилляции ($n_{в.мао} + V_{осц.мао}$);

4 – частота вращения ($n_{в.мао}$);

5 – сочетание величины продольной подачи и скорости осцилляции ($S_{п.мао} + V_{осц.мао}$);

6 – скорость осцилляции ($V_{осц.мао}$);

7 – величина продольной подачи ($S_{п.мао}$).

Анализ показал, что закономерность течения удельного съема материала с единицы площади одинакова для всех исследованных комбинаций движений. Единственное различие заключается в крутизне подъема кривой, выраженной в виде отношения dq/dt . С увеличением времени магнитно-абразивной обработки линейно возрастает удельный съем материала $q = f(t)$ (рисунок 2.3).

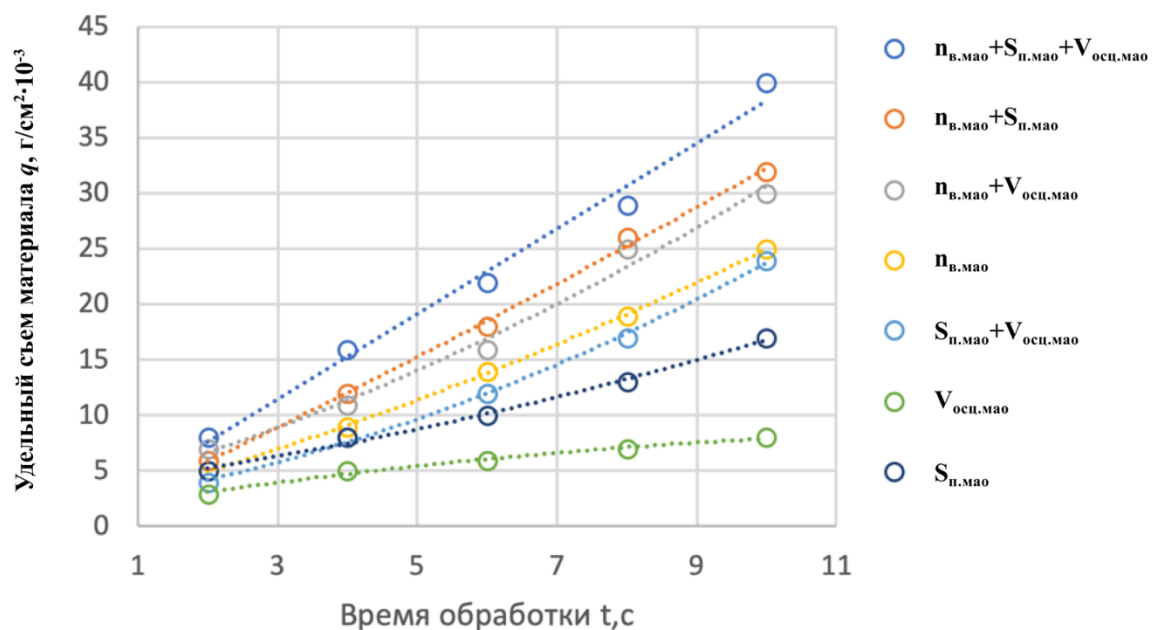


Рисунок 2.3 – Влияние сочетаний движений при магнитно-абразивной обработке заготовки на удельный съем материала q с единицы площади от времени обработки

Исследования показывают, что при всех сочетаниях движения значение шероховатости уменьшается. Наименьшая шероховатость R_a наблюдается при первых 4-5 минутах, а затем интенсивность снижения шероховатости значительно уменьшается (рисунок 2.4).

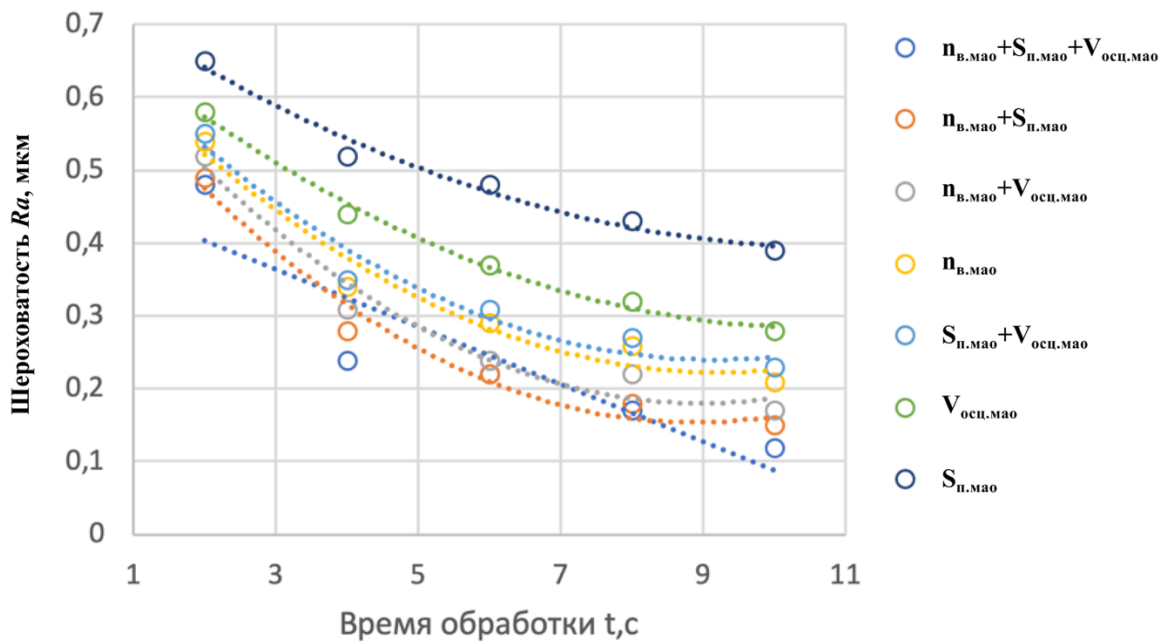


Рисунок 2.4 – Влияние сочетаний движений при магнитно-абразивной обработке заготовки на шероховатость поверхности R_a от времени обработки

Радиус скругления режущей кромки при всех выбранных сочетаниях рабочих движений также отличается только крутизной подъема кривых, описываемой отношением $d\rho/dt$ (рисунок 2.5).

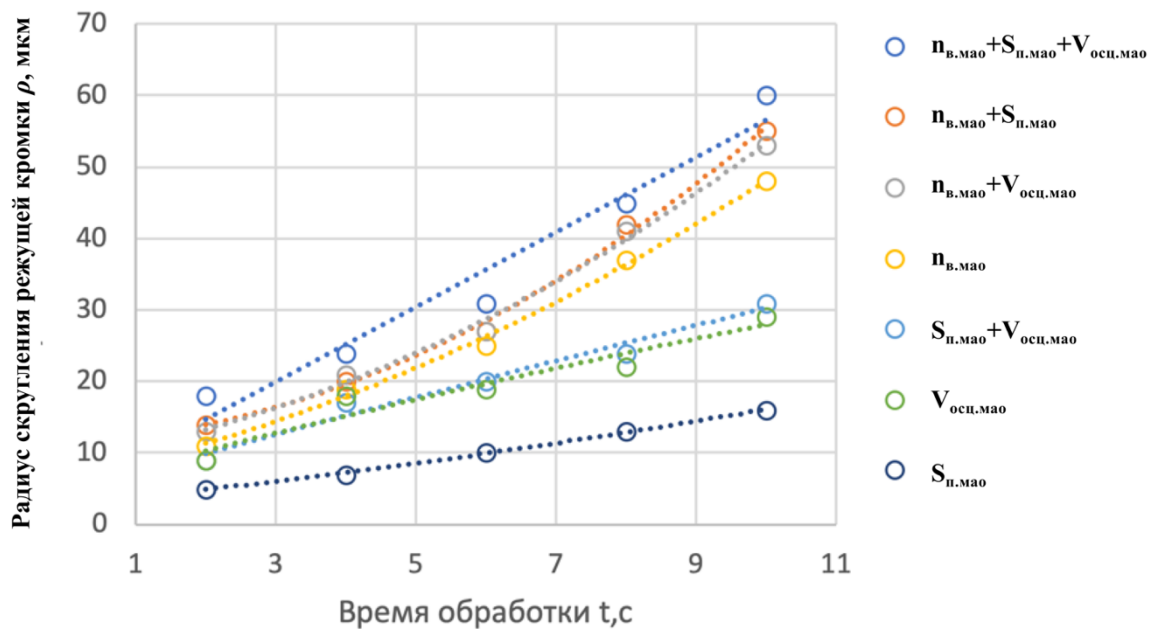


Рисунок 2.5 – Влияние сочетаний движений при магнитно-абразивной обработке заготовки на величину скругления режущей кромки ρ от времени обработки

2.2.3 Магнитно-абразивный комплекс для обработки режущих кромок и поверхностей керамических пластин

Одной из отличительных особенностей устройств для проведения магнитно-абразивной обработки является выбор магнитного индуктора [8; 56; 106]. Магнитные индукторы принято разделять на три категории: индукторы переменного тока, электромагнитные индукторы постоянного тока, индукторы на постоянных магнитах. В проводимых исследованиях использовался электромагнитный индуктор постоянного тока. Применение данной категории индукторов обусловлено возможностью регулирования и управления производительностью процесса обработки за счет изменения величины магнитной индукции. Регулирование осуществляется за счет управления значением величины тока в намагниченных катушках. Постоянное магнитное поле создается за счет специального устройства – преобразователя переменного тока в постоянный (выпрямителя). При использовании данного устройства формируется средняя магнитная индукция в диапазоне значений 0,1-2,5 Тл.

Для формирования режущей кромки керамических пластин методом магнитно-абразивной обработки использовалось устройство [91], разработанное совместно с доцентом, к.т.н Кексиным А.И. в лабораторном фонде Санкт-Петербургского Горного университета (рисунок 2.6).

Электромагнитное устройство устанавливается на станину фрезерного станка с ЧПУ. В данном случае использовался станок марки *Emco Concept Mill 250*. Для повышения жесткости системы при магнитно-абразивной обработке устройство было закреплено с помощью специальных приспособлений.

Устройство для проведения магнитно-абразивной обработки состоит из Г-образных элементов 1, основания с опорами 2, электромагнитных катушек 3, вспомогательного устройства для закрепления режущей пластины в процессе обработки 4 [76], режущей пластины 5, сменных полюсных наконечников 6 и ферроабразивного магнитного порошка 7.



Рисунок 2.6 – Устройство на базе фрезерного станка для магнитно-абразивной обработки, где 1 – Г-образные элементы, 2 – основание с опорами, 3 – электромагнитные катушки, 4 – вспомогательное приспособление крепления керамических пластин, 5 – керамическая пластина, 6 – сменные полюсные наконечники, 7 – магнитно-абразивный порошок

Электромагнитные катушки 3 располагаются на Г-образных элементах 1, которые в свою очередь закрепляются в опорах основания фрезерного стола. Для обеспечения жесткого закрепления Г-образных элементов 1 применяются болты и гайки.

Опоры располагаются в специально разработанных направляющих пазах, что позволяет перемещать Г-образные элементы 1 с закрепленным электромагнитными катушками 3 и производить быструю переналадку устройства под изделия с различными габаритами, а также регулировать рабочие зазоры между полюсными наконечниками и заготовкой.

Процесс магнитно-абразивной обработки [52] при помощи предложенного устройства осуществляется следующим образом. Для формирования траектории движения устройства крепления режущих пластин вместе с пластинами, закрепленного в шпинделе станка *Emco Concept Mill 250*, пишется управляющая программа. В данной программе кроме траектории движения закладываются и скорости обрабатываемой заготовки (в данном случае вспомогательное устройство крепления 4 с закрепленными в нем керамическими режущими пластинами) в рабочем пространстве электромагнитной системы, необходимой для реализации

процесса. Такими движениями являются вращательное, возвратно-поступательно вдоль полюсных наконечников и осциллирующее.

Далее обрабатываемые пластины 5 закрепляются во вспомогательном устройстве 4, которое в свою очередь крепится в шпинделе станка, и устанавливается длина рабочего пространства электромагнитной системы с учетом зазоров между полюсными наконечниками и заготовкой [8; 65; 82; 109; 112; 113]. При магнитно-абразивной обработке инструмента, который в данном исследовании представлен керамическими режущими пластинами, величина рабочего зазора равно 3 мм от полюсного наконечника до края обрабатываемой поверхности с обеих сторон соответственно.

После установки и закрепления всех элементов электромагнитной системы проводится предварительная проверка рабочей программы магнитно-абразивной установки. По итогам предварительной проверки делается заключение о надлежащем функционировании программы, после чего рабочее пространство обеспечивается магнитной индукцией со значением $B = 0,1$ Тл, в результате которого формируется электромагнитное поле. Рабочее пространство заполняется ферроабразивным магнитным порошком 7.

Затем, в рабочее пространство, заполненное магнитно-абразивным порошком 7, вводятся обрабатываемые режущие пластины 5, закрепленные во вспомогательном устройстве 4 и устанавливается требуемое значение магнитной индукции, после чего запускается процесс магнитно-абразивной обработки режущих пластин 5.

2.2.4 Определение диапазона рабочих движений магнитно-абразивной обработки керамических пластин

Для проведения комплексного исследования влияния магнитно-абразивной обработки на процесс формирования величины скругления режущих кромок и качество поверхности керамических пластин с возможностью получения достоверных результатов необходимо предварительное определение диапазона варьируемых параметров рабочих движений заготовки: частоты вращения и величины продольной подачи ($n_{в.мао} + S_{п.мао}$).

Рациональный подбор диапазона технологических параметров для проведения процесса магнитно-абразивной обработки осуществляется опытным путем, а оценка применимости выбранного диапазона осуществляется с использованием визуального контроля, в результате которого анализируется наличие возникающих и остаточных дефектов поверхности и посторонних включений в виде проникновения абразивных частиц в поверхностный слой изделия.

Экспериментальные исследования проводились на керамических пластинах марки ВОК-60 (рисунок 2.7) с использованием разработанного магнитно-абразивного устройства и специального приспособления крепления режущих пластин (рисунок 2.6) [41]. Характеристики керамических режущих пластин представлены в таблице 2.1.

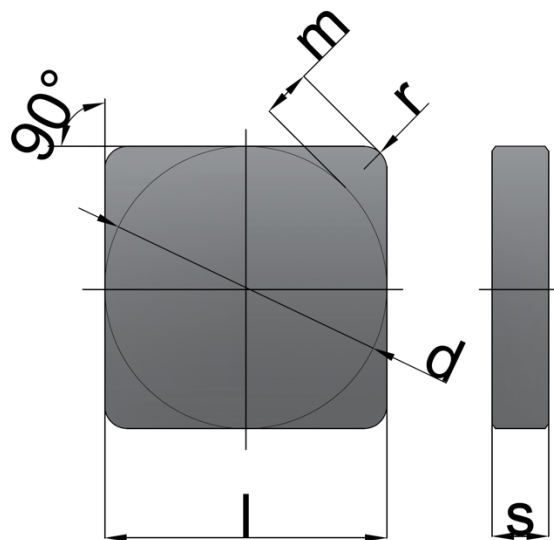


Рисунок 2.7 – Геометрические параметры керамической режущей пластины марки ВОК-60

При проведении исследований устанавливались следующие технологические параметры: электромагнитная индукция $B = 0,6$ Тл; время обработки $t_{\text{мао}} = 8$ мин, рабочий зазор $\delta = 3$ мм с каждой стороны. Магнитно-абразивная обработка осуществлялась с варьированием значений скорости вращения и подачи заготовки. Остальные технологические параметры оставались неизменны. В качестве абразивного инструмента применялся магнитно-абразивный порошок «АЛВОПОЛ» в количестве 125 г.

Таблица 2.1 – Физико-механические свойства и геометрические характеристики минералокерамического инструментального материала марки ВОК-60

Физико-механические свойства		Геометрические характеристики	
Марка режущего материала, $Al_2O_3 + TiC$	ВОК-60	Ширина l , мм	12
Предел прочности (изгиб) МПа $\times 10^3$, не менее	0,637	Длина d , мм	12
Предел прочности (сжать) МПа $\times 10^3$, не менее	1,80-3,00	Толщина S , мм	5
Плотность $\times 10^3$, кг/м ³	4,20-4,30	Радиус при вершине r , мм	5
Твердость HRA, не менее	93	-	-
Критическая температура, C^0	1100	-	-

В качестве первоначального диапазона изучаемых значений рабочих движений выбрана частота вращения $n_{в.мао}$ от 100 до 1000 мин⁻¹, скорость продольной подачи вспомогательного устройства с закрепленными режущими пластинами вдоль полюсных наконечников $S_{п.мао}$ от 25 до 400 мм/мин.

С целью установления максимальных и минимальных крайних значений проводится эксперимент со значениями $n_{в.мао} = 1000$ мин⁻¹, $S_{п.мао} = 400$ мм/мин и $n_{в.мао} = 100$ мин⁻¹, $S_{п.мао} = 25$ мм/мин соответственно. Визуальный контроль показал, что в первом случае наблюдаются сильные вкрапления на поверхности керамических режущих пластин с одновременными сколами вдоль всей режущей кромки (рисунок 2.8, а), а во втором – минимальные визуальные изменения, которые говорят о неэффективности обработки при выбранных параметрах (рисунок 2.8, б).

Проведенные исследования показали, что частота вращения $n_{в.мао}$ оказывает значительное влияние даже при относительно малых значениях электромагнитной индукции. Визуальный контроль обработанной поверхности показал, большие значения частоты вращения $n_{в.мао}$ приводят к возрастанию силы столкновения магнитно-абразивных частиц с поверхностью заготовки. Особенно это наблюдается в углах заготовки и вдоль режущей кромки. Воздействие большей силы со стороны абразивных зерен приводит к большей интенсивности скругления

режущей кромки, а также к вдавливанию абразивной массы в обрабатываемую поверхность.

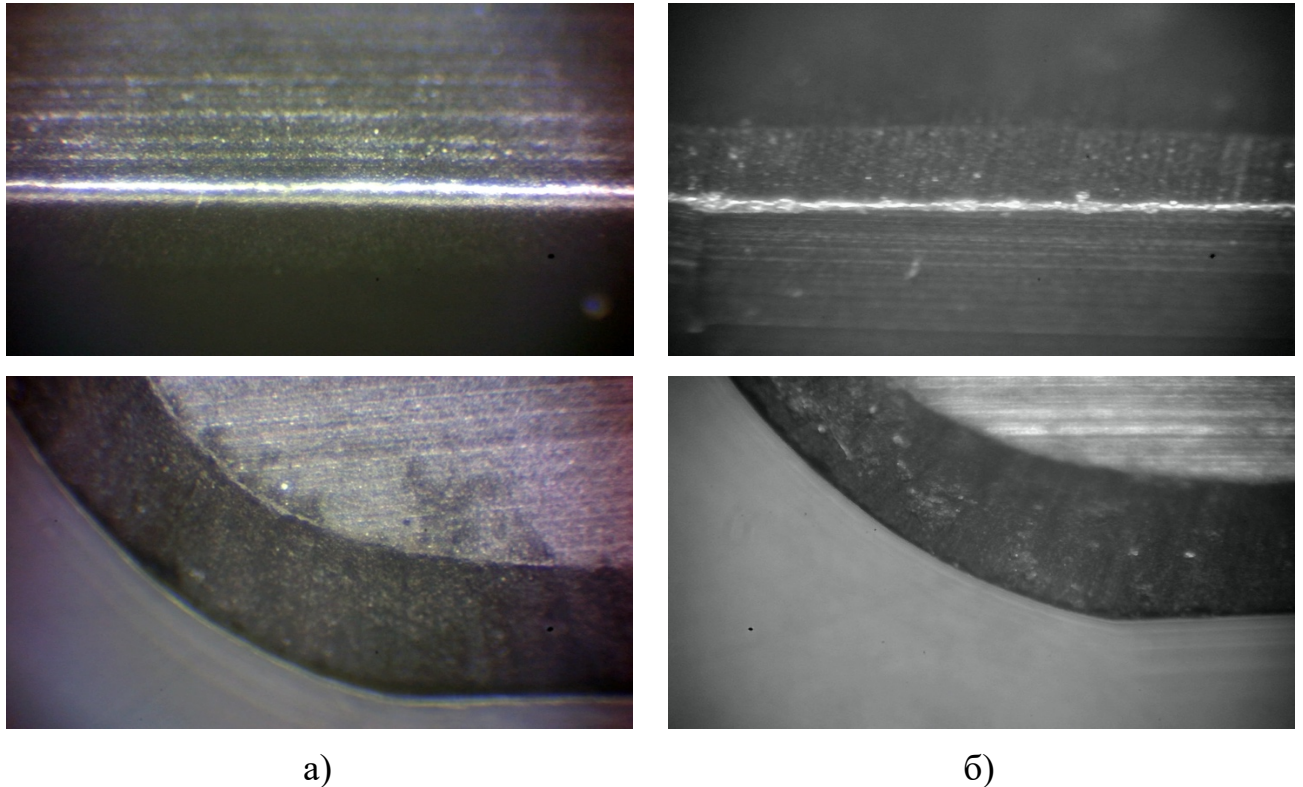


Рисунок 2.8 – Магнитно-абразивная обработка при: а) $n_{в.мао} = 1000 \text{ мин}^{-1}$, $S_{п.мао} = 400 \text{ мм/мин}$; б) $n_{в.мао} = 100 \text{ мин}^{-1}$, $S_{п.мао} = 25 \text{ мм/мин}$

Результаты экспериментальных исследований значения технологических параметров магнитно-абразивной обработки показывают, что значение величины продольной подачи $S_{п.мао}$ следует задавать не более 225 мм/мин, а скорость вращения заготовки $n_{в.мао}$ – не более 600 мин^{-1} .

Таким образом, из результатов проведенных экспериментальных исследований рекомендованный диапазон значений частоты вращения заготовки $n_{в.мао}$ принимается в диапазоне от 100 до 600 мин^{-1} , а диапазон значений продольной подачи $S_{п.мао}$ принимается равным от 25 до 255 мм/мин.

2.3 Создание рабочей технологической среды при магнитно-абразивной обработке керамических режущих пластин

При магнитно-абразивной обработке формируется рабочая технологическая среда, состоящая из абразивного порошка, обладающего ферромагнитными

свойствами, и смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). В данной паре наибольшее значение имеет ферроабразивный порошок (ФАП), способный оказывать прямое влияние на эффективность и качественный результат магнитно-абразивной обработки [82].

Главной задачей магнитно-абразивной обработки является обеспечение технологического качества поверхностей, формирование правильной геометрии заготовки и эффективность обработки. Применение рациональной схемы обработки, подобранной индивидуально для каждого типа заготовки в зависимости от формы и габаритных размеров, сочетания рабочих движений и диапазонов технологических параметров процесса обработки, позволяет обеспечить выполнение задачи качественной обработки только при правильном выборе ФАП.

2.3.1 Магнитная индукция при магнитно-абразивной обработке керамических пластин

Параметр магнитной индукции является одной из главных характеристик, определяющих формирование сил резания при магнитно-абразивной обработке и намагниченность порошка. Величина магнитной индукции оказывает влияние на давление порошка и силу его прижима к поверхности заготовки. Магнитная индукция формирует жесткость магнитно-абразивной «щетки» [80], удерживает ферроабразивный порошок в рабочем пространстве и формирует силы резания.

Так увеличение параметра электромагнитной индукции способствует необходимому магнитному насыщению рабочей среды, а также приводит к возрастанию магнитных потоков рассеивания за пределами рабочего зазора [8]. Величина магнитного поля вне рабочей зоны начинает снижаться, приводя к разделу двух сред: рабочая зона и воздух. Это подталкивает абразивные частицы к выходу за пределы рабочего зазора.

При увеличении электромагнитной индукции возрастает давление ферроабразивного порошка на обрабатываемую поверхность заготовки. Это приводит к увеличению силы резания и, как следствие, к повышению удельного съема материала с единицы площади [60]. Исследования в данной области

показывают, что изменение давления магнитно-абразивного порошка на заготовку при изменении величины магнитной индукции подчиняется линейному закону.

При магнитно-абразивной обработке ферромагнитных материалов значение величины удельного съема материала с единицы площади имеет определенный пик, зависящий от величины электромагнитной индукции. При достижении данного пика и последующего увеличении электромагнитной индукции объем снимаемого материала с поверхности заготовки практически не изменяется. Это можно объяснить намагничиванием и насыщением обрабатываемой заготовки [65]. При магнитно-абразивной обработке неферромагнитных материалов описываемая зависимость не проявляется, что является причиной их немагнитности.

Для определения диапазона оптимальных значений параметра электромагнитной индукции проводились экспериментальные исследования магнитно-абразивной обработки керамических режущих пластин марки ВОК-60. Как и при определении рабочих движений использовались пластины, характеристики которых указаны в таблице 2.1. В качестве других параметров применялись: время обработки $t_{\text{мао}} = 10$ мин, частота вращения $n_{\text{в.мао}} = 250 \text{ мин}^{-1}$, величина продольной подачи $S_{\text{п.мао}} = 125 \text{ мм/мин}$. В качестве исследуемого диапазона магнитной индукции выбраны значения от 0,2 до 1,2 Тл. Проведение экспериментальных исследований осуществлялось на разработанной магнитно-абразивной установке (рисунок 2.6) по предложенной схеме (рисунок 2.1) [29].

Анализ эффективности применения и варьирования параметров электромагнитной индукции осуществлялся с использованием визуального контроля обработанной поверхности (рисунок 2.9).

По итогам экспериментальных исследований установлено, что электромагнитная индукция равная 0,2 Тл не обеспечивает съем материала и необходимый радиус режущей кромки. При значении 1,2 Тл наблюдается слишком сильное изменение геометрии режущей кромки, и образование вкраплений абразивного материала на обрабатываемой поверхности.

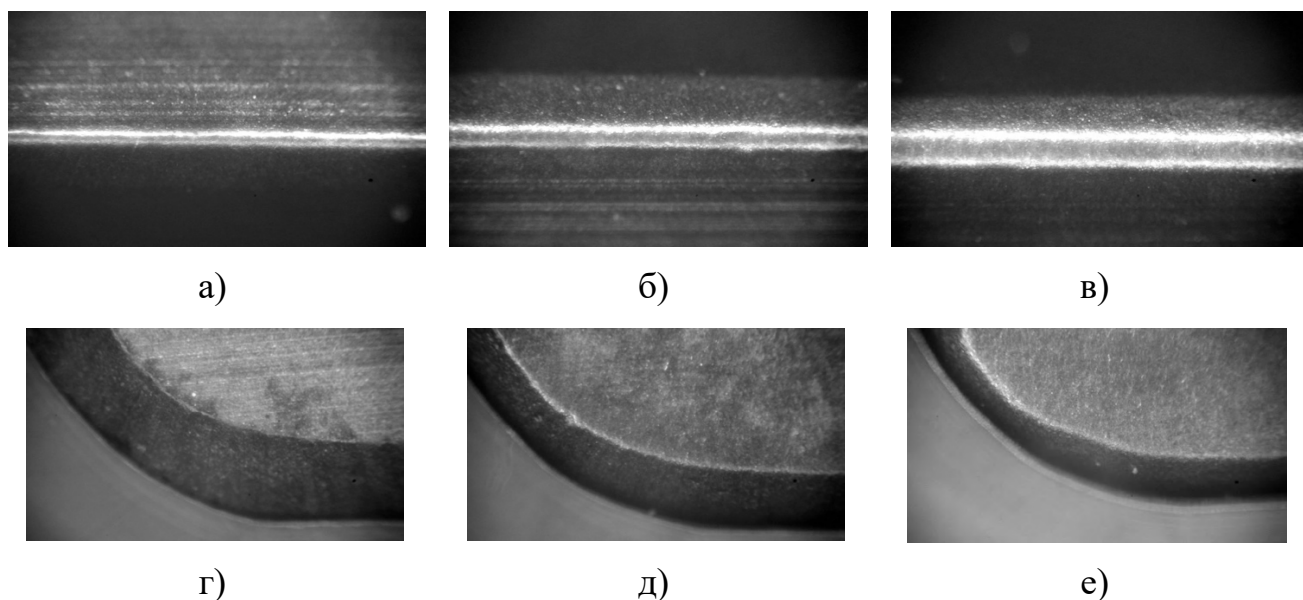


Рисунок 2.9 – Магнитно-абразивная обработка при значениях: $t_{\text{мао}} = 10$ мин, $n_{\text{в.мао}} = 250$ мин⁻¹, $S_{\text{п.мао}} = 125$ мм/мин, где а) режущая кромка при $B = 0,2$ Тл, б) режущая кромка при $B = 0,6$ Тл, в) режущая кромка при $B = 1,2$ Тл, г) вершина режущей пластины при $B = 0,2$ Тл, д) вершина режущей пластины при $B = 0,6$ Тл, е) вершина режущей пластины при $B = 1,2$ Тл

На основании проведенных исследований установлено, что оптимальным диапазоном магнитной индукции при обработке керамических режущих пластин, применяемый при последующий исследованиях, является диапазон от 0,35 до 0,95 Тл.

2.3.2 Абразивный материал при магнитно-абразивной обработке керамических режущих пластин

Эффект влияния ферромагнитных абразивных частиц при магнитно-абразивной обработке на обрабатываемую поверхность изделия существенно зависит от физико-химических свойств абразивного компонента ФАП. В качестве данного компонента выступают традиционные абразивные материалы. Их условно делят на две категории: естественные и искусственные.

Естественные абразивные материалы, такие как кварц, наждак, применяют при обработке достаточно редко вследствие их невысокой твердости. Корунд и алмаз также не обрели высокой популярности в обрабатывающей промышленности по причине высокой стоимости и ограниченности запасов [86].

На сегодняшний день все активнее применяются при обработке изделий искусственные материалы. К данной категории можно отнести карбиды титана, бора, кремния, а также электрокорунд и алмаз [58].

Об эффективности применения ферроабразивного материала можно судить по его абразивным свойствам, которые выражаются в механической способности резать, диспергировать, царапать другой материал [84].

Способность материала разрушать поверхность материалов при механическом взаимодействии с ним, характеризующая абразивные свойства инструмента, представляет собой сложную функцию его механических и физико-химических свойств [83]. Среди имеющихся свойств абразивного материала, к наиболее важным можно отнести твердость (микротвердость), механическую прочность, форму и размер частиц. В работе [102] была отмечена прямая зависимость значения микротвердости и абразивной способности зерен.

Геометрия зерна, а именно его длина, высота и ширина, также оказывает влияние на работоспособность ФАП при различных операциях магнитно-абразивной обработки [16].

При выборе абразивного материала следует учитывать большое количество факторов: задача, которая ставится перед процессом обработки, объем снимаемого материала с поверхности заготовки, достигаемая шероховатость поверхности, физические и химические характеристики обрабатываемого материала, метод предшествующей обработки, метод обработки и конструктивные особенности применяемого оборудования.

Выбор оптимального состава абразивного порошка – важнейший фактор магнитно-абразивной обработки, который определяет качество, производительность и себестоимость процесса. При выборе состава магнитно-абразивного порошка следует брать во внимание, что на достигаемое качество в процессе магнитно-абразивной обработки основное влияние оказывает адгезионная совместимость ферроабразивного порошка с материалом обрабатываемого изделия, а эффективность процесса обработки зависит от магнитных и механических свойств применяемого порошка.

При этом для эффективного микрорезания и полирования поверхности величина работы адгезии должна быть меньше поверхностного натяжения обрабатываемого материала [31; 46].

Существует две группы абразивных порошков: однородные и композиционные. В качестве однородных применяются альсифер, альперм и ферриты. Однако, их твердость является недостаточной для обеспечения качественной обработки сталей, чугунов и режущей керамики в процессе магнитно-абразивной обработки. С целью повышения режущей способности абразивного материала прибегают к применению композиционных материалов. Композиционный порошок представляет собой соединение режущей и магнитной составляющих, полученное посредством их спекания.

Получаемая микротвердость таких абразивных порошков на порядок выше однородных, но получение композиционных материалов трудоемкий процесс, требующий специального оборудования. Также стоит отметить более высокую себестоимость изготовления композиционных материалов, что может влиять на причину выбора в пользу однородных порошков по мере возможности их применения. Предпочтение однородным магнитно-абразивным порошкам отдается в случае эффективности их применения, например в случае обработки цветных металлов [2; 9].

Для обеспечения протекания процесса магнитно-абразивной обработки и достижения высокой его производительности при выборе абразивного порошка следует опираться на соотношение твердости обрабатываемого материала и абразива.

Максимальная производительность процесса магнитно-абразивной обработки будет наблюдаться при использовании абразивного материала, который в 1,5 раза выше (2.1) твердости обрабатываемой заготовки при условии подбора оптимальных технологических параметров обработки [8]:

$$H_a/H_m > 1,5, \quad (2.1)$$

где H_a – твердость абразива, МПа;

H_m – твердость обрабатываемого материала, МПа.

В качестве абразивного материала, применяемого при магнитно-абразивной обработке режущих пластин марки ВОК-60, использовался порошок «АЛВОПОЛ» (Таблица 2.2). Форма зерен абразивного порошка представлена на рисунке 2.10.

Таблица 2.2 – Состав, структура и основные свойства композиционного магнитно-абразивного порошка «АЛВОПОЛ»

Абразив	Магнитная основа	Расположение абразива	Содержание абразива, об %	Насыпная масса, г/см ²	Магнитно-массовая проба, г
Алмаз АСМ 7/5	Железо	На поверхности	40	2,6	99,1

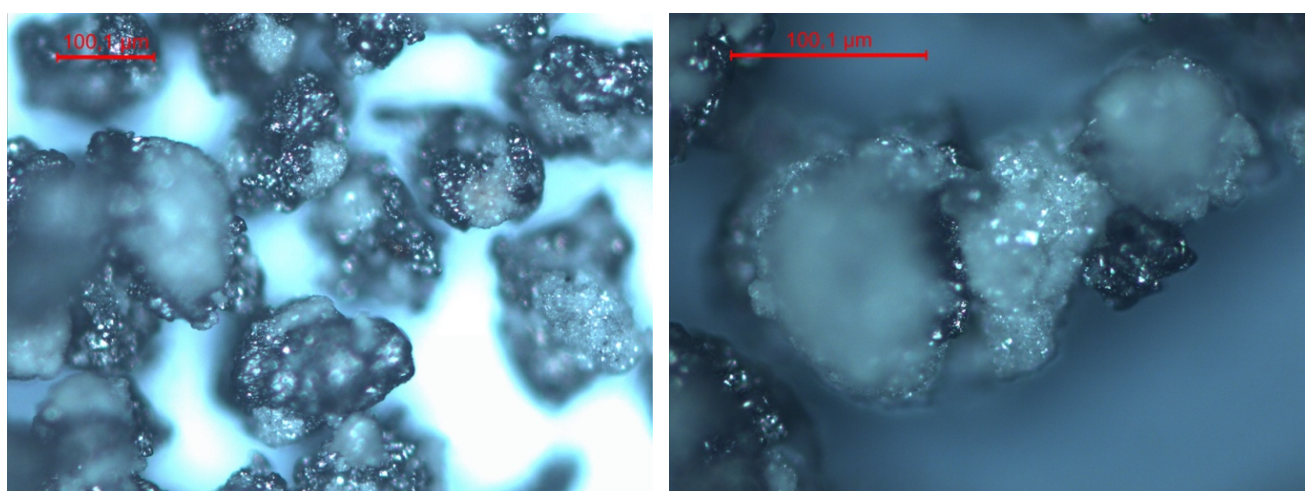


Рисунок 2.10 – Форма абразивных зерен магнитно-абразивного порошка «АЛВОПОЛ»

Твердость керамических пластин определялась по Виккерсу с использованием микротвердомера ПМТ-3 (рисунок 2.11). Определение микротвердости производилось по отпечаткам алмазной пирамидки с нагрузкой 500 г посредством трех измерений в различных точках и вычислению среднего значения, которое составило $HV \cdot 10^{-1} = 63$ МПа, твердость магнитно-абразивного порошка составляет $HV \cdot 10^{-1} = 96,5$ МПа [27; 62].

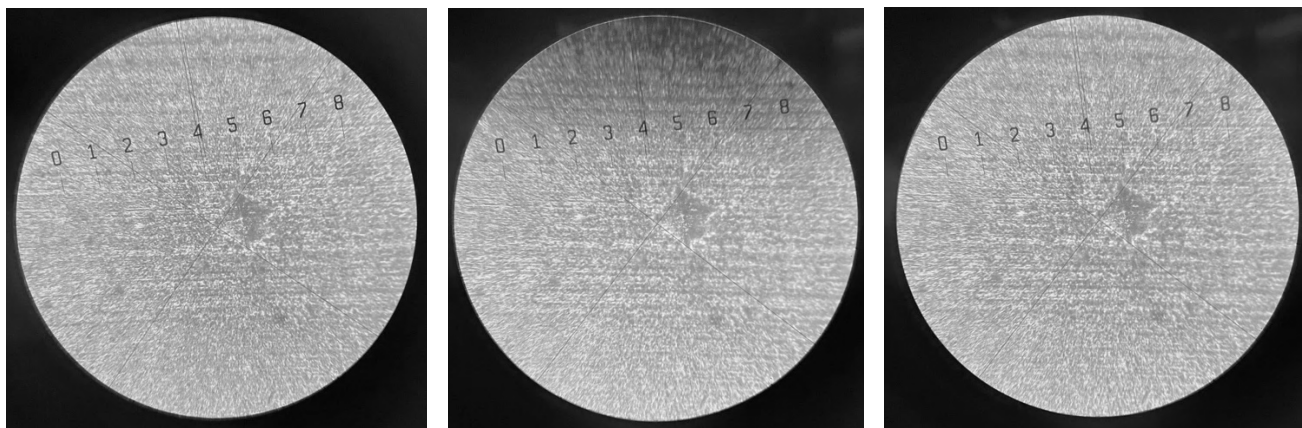


Рисунок 2.11 – Измерение микротвердости керамических пластин марки ВОК-60

Таким образом, согласно неравенству (2.2), твердость абразивного материала превышает твердость обрабатываемого материала более чем в 1,5 раза. Следовательно, использование данной марки порошка целесообразно при магнитно-абразивной обработке керамических пластин ВОК-60.

$$H_a/H_m = \frac{96,5}{63} = 1,53 > 1,5. \quad (2.2)$$

Фракция и размер абразивных частиц оказывают значительное влияние на удельный съем материала с единицы площади, качество обрабатываемой поверхности, стойкость порошка и его износ [8]. Снижение размера абразивных зерен увеличивает количество их прилегания к обрабатываемой поверхности, что положительно влияет на уменьшение шероховатости [60].

Размер абразивных частиц порошка непосредственно влияет на активность резания и производительность процесса обработки. Существует определенная закономерность, которая говорит о том, что чем больше размер зерна, тем больше значение радиусов его округления. Меньшие размеры радиуса округления зерен приводят к повышению активности микрорезания. При повышении радиуса округления зерен магнитно-абразивного порошка наблюдается переход от микрорезания к пластическому деформированию поверхности и ее истиранию. В следствие этого подбор абразивного инструмента является индивидуальной задачей, которая зависит от материала обрабатываемой заготовки и условий осуществления процесса.

На величину силы резания магнитно-абразивного порошка в процессе обработки детали влияет значение рабочего зазора и степень его заполняемости ферроабразивным порошком. С увеличением заполняемости рабочего зазора магнитным порошком возрастает удельное давление абразивных частиц на поверхность заготовки, с уменьшением – удельное давление снижается [60].

Твердость абразивного инструмента, превышающая твердость обрабатываемого материала в несколько раз, приводит к увязанию абразивных частиц в материале заготовки. Это проявляется в качестве возникновения дефектов на поверхности заготовки.

В связи с этим, рекомендуется индивидуально подбирать величину рабочего зазора путем пробных серий обработки во избежание возникновения эффекта заклинивания. В качестве оптимального рабочего зазора принято считать расстояние от 2 до 3 мм от полюсных наконечников до обрабатываемой заготовки, при этом придерживаясь степени заполняемости более 0,8 [65].

2.3.3 Обоснование выбора смазочно-охлаждающей жидкости для создания технологического инструмента

В процессе магнитно-абразивной обработки применяют смазочно-охлаждающие жидкости, которые приводят к снижению температуры в зоне обработки и способствуют дополнительному полированию поверхности заготовки. Наличие поверхностно-активных веществ в составе СОЖ влияет на производительность процесса магнитно-абразивной обработки, а также увеличивает интенсивность процесса снятия тонких химических пленок.

Использование смазочно-охлаждающих жидкостей в процессе магнитно-абразивной обработки уменьшает поверхностную энергию металла и способствует деформации поверхностного слоя и его разрушению, благодаря наличию в составе поверхностно-активных веществ [8; 110].

В процессе магнитно-абразивной обработки с применением смазочно-охлаждающих жидкостей изменяется тип стружки при микрорезании [8; 65]. При ведении процесса без смазочно-охлаждающей жидкости наблюдается более

длинная геометрическая форма стружки, в отличие от обработки с применением смазочно-охлаждающей жидкости.

В первом случае в процессе микрорезания принимают участие только абразивные зерна большого размера, а в другом – различного размера, что и способствует эффективности процесса обработки и увеличению снимаемого материала с единицы площади.

Положительной особенностью протекания процесса магнитно-абразивной обработки с использованием смазочно-охлаждающей жидкости является повышение качества формируемой поверхности заготовки. Кроме этого, уменьшается количество вкраплений абразивного порошка в обрабатываемую поверхность.

Подбор смазочно-охлаждающей жидкости проводился опытным путем, в котором применялись четыре вида синтетических смазочно-охлаждающих жидкостей с химическим составом. Химический состав исследуемых жидкостей представлен в таблице 2.3. Также в качестве альтернативы синтетическим смазочно-охлаждающим жидкостям применялись жидкости на эмульсионной основе: ECOCOOL GLOBAL 10 UK и Унизор ТУ 0253-001-1764563-2016.

Таблица 2.3 – Состав исследуемых смазочно-охлаждающих жидкостей

Синтетические смазочно-охлаждающие жидкости			
Вид 1	Вид 2	Вид 3	Вид 4
Тринатрифосфат 1 %	Тринатрифосфат 1 %	Моноэтаноламин 1,5 %	Моноэтаноламин 0,5 %
Нитрит натрия 1 %	Бензойная кислота 1-2 %	Нитрит натрия 1 %	Нитрит натрия 2 %
ПЭГ-400 0,5 %	ПЭГ-400 1 %	ПЭГ-400 1 %	ПЭГ-400 – 1 %
ПЭГ-400 0,5 %	Изопрапанол 5 %	Изопрапанол 5 %	ОП-10 0,2 %

Исследования по влиянию смазочно-охлаждающих жидкостей на качество обрабатываемых поверхностей при магнитно-абразивной обработке проводились на разработанной установке (рисунок 2.6) с сочетанием рабочих движений: вращение, продольная подача заготовки и осцилляция.

В каждом отдельном эксперименте сохранялись значения технологических параметров магнитно-абразивной обработки: электромагнитная индукция $B = 0,6$ Тл; время обработки $t_{\text{мао}} = 10$ мин; частота вращения заготовки $n_{\text{в.мао}} = 250$ мин⁻¹; скорость продольной подачи $S_{\text{п.мао}} = 125$ мм/мин. В проводимых исследованиях в качестве магнитно-абразивного инструмента применялся порошок марки «АЛВОПОЛ». В качестве заготовок применялись керамические режущие пластины марки ВОК-60.

При магнитно-абразивной обработке с использованием синтетических смазочно-охлаждающих жидкостей (таблица 2.3) наблюдалось образование пены и формирование матовой поверхности обработанной заготовки.

При использовании эмульсионных жидкостей образование пены отсутствовало, формировалась блестящая поверхность обработанной заготовки.

Исходя из результатов проведенных исследований по магнитно-абразивной обработке керамических пластин марки ВОК-60, рекомендуется в данном конкретном случае применять масляные водорастворимые смазочно-охлаждающие жидкости на эмульсионной основе. Среди таких жидкостей можно выделить ECOCOOL GLOBAL 10 UK, которая будет использоваться в последующих исследованиях.

2.4 Выводы по второй главе

1. Выбрана схема и разработан способ магнитно-абразивной обработки керамических режущих пластин, который позволяет производить равномерный сьем материала с единицы площади, способствует снижению значения шероховатости поверхности обрабатываемой заготовки, позволяет формировать радиус скругления режущей кромки инструмента, а в частности:

– определена совокупность движений заготовки при магнитно-абразивной обработке, которая включает в себя частоту вращения заготовки ($n_{\text{в.мао}}$), величину продольной подачи ($S_{\text{п.мао}}$) и скорости осцилляции ($V_{\text{осц.мао}}$). Для разработанного устройства частота вращения заготовки $n_{\text{в.мао}}$, мин⁻¹ выступает в качестве движения резания, а движением подачи служит продольная подача заготовки вдоль полюсных наконечников $S_{\text{п.мао}}$, мм/мин;

– обоснована схема магнитно-абразивной обработки инструмента, а именно его режущей кромки и рабочих поверхностей, которая позволяет производить равномерный съём материала с единицы площади вдоль всей поверхности инструмента, а также способствует процессу скольжения абразивных частиц о поверхность с исключением возникновения микроудара;

– предложен подходящий способ магнитно-абразивной обработки с применением двух полюсных наконечников постоянного тока, позволяющий подготавливать керамические режущие пластины различных типоразмеров в условиях реального производства.

2. Определены технологические параметры магнитно-абразивной обработки и установлен диапазон их варьирования, выбрана марка и состав порошка, выступающего в качестве магнитно-абразивного инструмента, подобран состав смазочно-охлаждающей жидкости для осуществления эффективного процесса обработки режущих кромок и рабочих поверхностей керамических режущих пластин ВОК-60, а в частности:

– установлен диапазон значений рабочих движений заготовки при ее обработке магнитно-абразивным методом с учетом выбранной схемы и разработанного оборудования, применяемый для дальнейших экспериментальных исследований: частота вращения заготовки $n_{в.мао} = 100-600 \text{ мин}^{-1}$, величина продольной подачи $S_{п.мао} = 25-225 \text{ мм/мин}$;

– установлен оптимальный диапазон значений электромагнитной индукции $B = 0,35-0,95 \text{ Тл}$, применяемый при дальнейших экспериментальных исследованиях;

– проведены исследования по определению марки смазочно-охлаждающей жидкости, по результатам которых предпочтение было отдано масляным водорастворимым жидкостям на эмульсионной основе, способствующим повышению производительности и препятствующим пенообразованию.

ГЛАВА 3 МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА КЕРАМИЧЕСКИХ РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН

Повышение механических и эксплуатационных свойств изделий неразрывно связано с совершенствованием технологического процесса изготовления деталей. Одним из элементов технологической системы обработки изделия является режущий инструмент, который определяет геометрию обработанного изделия, качество его поверхностного слоя, наличие остаточных напряжений и т.д. Совокупность параметров полученного изделия и определяет его долговечность и износостойкость в процессе эксплуатации.

С целью обеспечения требуемых высоких качественных характеристик прецизионных изделий из хладостойких сталей требуется предварительная подготовка режущего инструмента [6; 10; 12; 26; 34; 48; 59; 66]. Это обусловлено тем, что процесс доводки режущего инструмента позволяет изменить его микрогеометрию, удалить следы предыдущей обработки, а также сформировать упрочняющий слой на поверхности инструмента, положительно влияющий на его эксплуатационные свойства.

Проведенный анализ способов предварительной подготовки и доводки режущего инструмента показал, что на сегодняшний день один из наиболее предпочтительных и перспективных методов является метод магнитно-абразивной обработки. Отличительной особенностью данного метода является возможность регулирования жесткости магнитно-абразивной «щеткой», которая в процессе магнитно-абразивной обработки выступает нежестким инструментом, участвующим в формировании поверхности изделия. В работе в качестве изделий рассматривались керамические режущие пластины марки ВОК-60.

Производительность и эффективность процесса магнитно-абразивной обработки определяется степенью жесткости магнитно-абразивного инструмента. Характеристика жесткости формирует величину силового воздействия абразивных зерен на обрабатываемую поверхность, что в конечном итоге сказывается на качестве обработанного изделия [8; 61; 81; 85]. Благодаря существующей возможности по регулированию значения жесткости магнитно-абразивного

инструмента (МАИ) процесс доводки инструмента является не только контролируемым и прогнозируемым, но и управляемым за счет вариативности параметров обработки.

Проведение магнитно-абразивной обработки должно осуществляться при наличии знаний основных зависимостей и закономерностей, оказывающих влияние на формирование величины скругления режущей кромки и шероховатость рабочих поверхностей, а также при подборе оптимальных режимных параметров процесса обработки.

Для достижения вышеописанной цели следует:

- установить зависимость влияния технологических факторов МАО на формирование величины шероховатости и радиус скругления режущей кромки;
- установить влияние технологических факторов МАО на эффективность и производительность процесса.

3.1 Методика проведения экспериментальных исследований по предварительной подготовке керамических режущих пластин методом магнитно-абразивной обработки

Экспериментальные исследования по формированию микрогеометрии и качественных характеристик приповерхностного слоя керамических режущих пластин проводились на усовершенствованном специализированном комплексе (рисунок 2.6), расположенном на базе Санкт-Петербургского горного университета. Магнитно-абразивная обработка осуществлялась согласно разработанной схеме, отвечающей необходимым параметрам эффективности процесса доводки инструмента (рисунок 2.1).

В качестве экспериментальных образцов применялись керамические режущие пластины марки ВОК-60 ГОСТ 25003-81 (таблица 2.1).

Для формирования магнитно-абразивного инструмента в рабочем пространстве электромагнитной системы применялся композиционный магнитно-абразивный порошок «АЛВОПОЛ» (таблица 2.2). Выбор данного магнитно-абразивного инструмента обоснован высокой твердостью по отношению к обрабатываемому изделию, что является необходимым условием для протекания

процесса микрорезания в процессе магнитно-абразивной обработки керамических пластин марки ВОК-60. Зернистость магнитно-абразивного порошка находилась в диапазоне $\Delta = 250/180$ мкм.

Технологические параметры при магнитно-абразивной обработке варьировались в диапазонах, указанных в таблице 3.1.

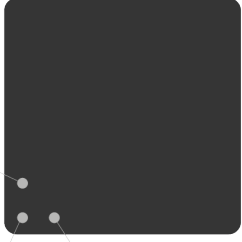

Таблица 3.1 – Варьируемые, статические и измеряемые параметры МАО с их диапазонами

Варьируемые параметры	Символ	Уровень				
		-2	-1	0	+1	+2
1. Величина электромагнитной индукции (Тл)	A	0,35	0,5	0,65	0,8	0,95
2. Время обработки (мин)	B	4	6	8	10	12
3. Частота вращения (мин^{-1})	C	100	225	350	475	600
4. Величина продольной подачи (мм/мин)	D	25	75	125	175	225
Статические параметры						
Керамическая пластина	Марка ВОК-60 (12 мм x 12 мм x 4 мм) ГОСТ 25003-81					
Тип ферромагнитного абразивного порошка (ФАП)	«АЛВОПОЛ» на основе алмаза АСМ 7/5					
Содержание абразива в ФАП, об %	40					
Расположение абразива в зернах ФАП	На поверхности					
Магнитная основа ФАП	Железо					
Зернистость порошка Δ	250/180 мкм					
Объем ФАП	125 г					
Рабочий зазор между заготовкой и полюсными наконечниками	3 мм					
Смазочно-охлаждающая жидкость	ECOCOOL GLOBAL 10 UK					
Изменяемые параметры						
1. Шероховатость поверхности керамических пластин R_a , мкм;						
2. Производительность процесса МАО, выраженная в удельном съеме материала с единицы площади q , г/см ² ;						
3. Радиус скругления режущей кромки ρ , мкм.						

Измерение шероховатости R_a производилось по передней и задней поверхностям керамических режущих пластин при помощи профилометра *Mitutoyo Surftest SJ-210*. Измерение проводились в 3 точках на передней поверхности и в 4

точках на задней поверхности (таблица 3.2). Для достижения высокой достоверности значений измерения проводились по 3 серии.

Таблица 3.2 – Точки снятия показаний шероховатости поверхности на 4-гранных пластинах марки ВОК-60

Передняя поверхность	Задняя поверхность
 <p>Точка 1 Точка 2 Точка 3</p>	 <p>Точка 4 Точка 5 Точка 6 Точка 7</p>

Для расчета значения шероховатости использовалось среднее значение по исследуемой стороне (3.1):

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{ai}, \quad (3.1)$$

где n – общее количество измерений по каждой из сторон.

На рисунках 3.1 и 3.2 приведены примеры результатов измерения шероховатости, полученные в результате исследований.

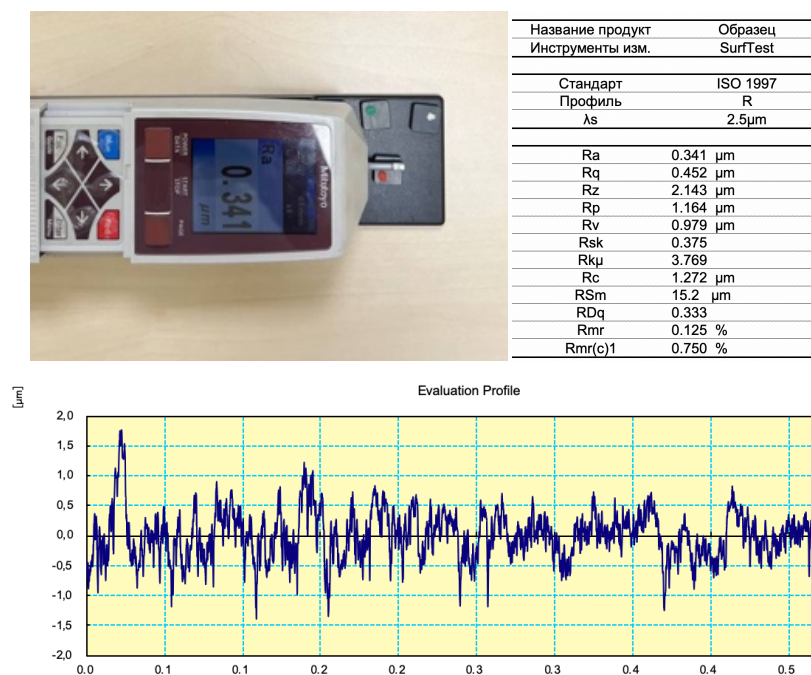


Рисунок 3.1 – Измерение значения шероховатости режущих пластин марки ВОК-60 до МАО

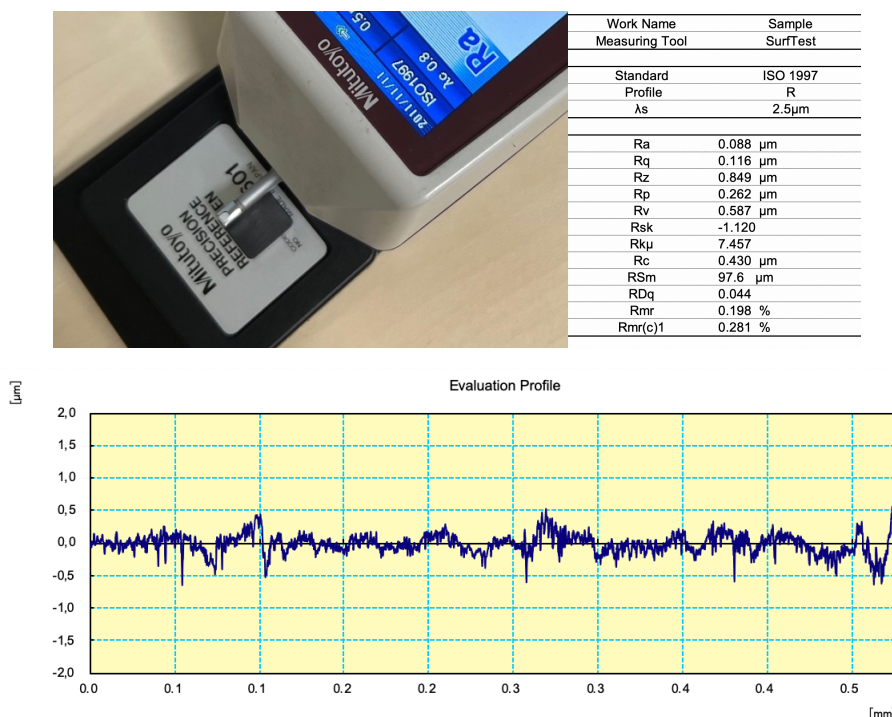


Рисунок 3.2 – Измерение значения шероховатости режущих пластин марки ВОК-60 после МАО

Эффективность магнитно-абразивной обработки определялась по удельному съему материала с единицы площади q . Для этого проводились измерения веса керамических пластин ВОК-60 до и после магнитно-абразивной обработки. В дальнейшем определялась разница веса керамических пластин, которая являлась индикатором производительности магнитно-абразивной обработки. Определение веса режущих пластин проводилось на весах марки *ВЛТЭ 310* (рисунок 3.3).

Анализ состояния поверхности керамических пластин, наличие дефектов и других следов после магнитно-абразивной обработки осуществлялся посредством визуального контроля. Для оценки качества поверхности по визуальному признаку использовался микроскоп *MarVision MM320* (рисунок 3.4).

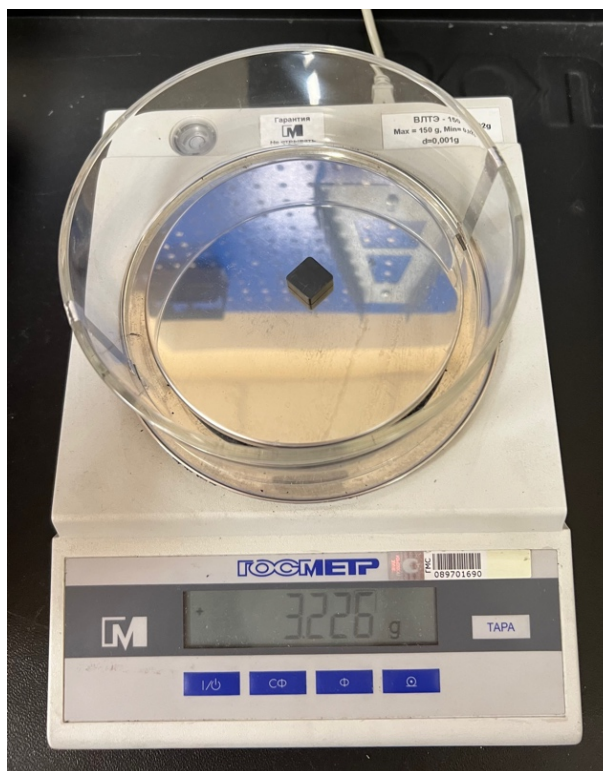


Рисунок 3.3 – Весы ВЛТЭ 310

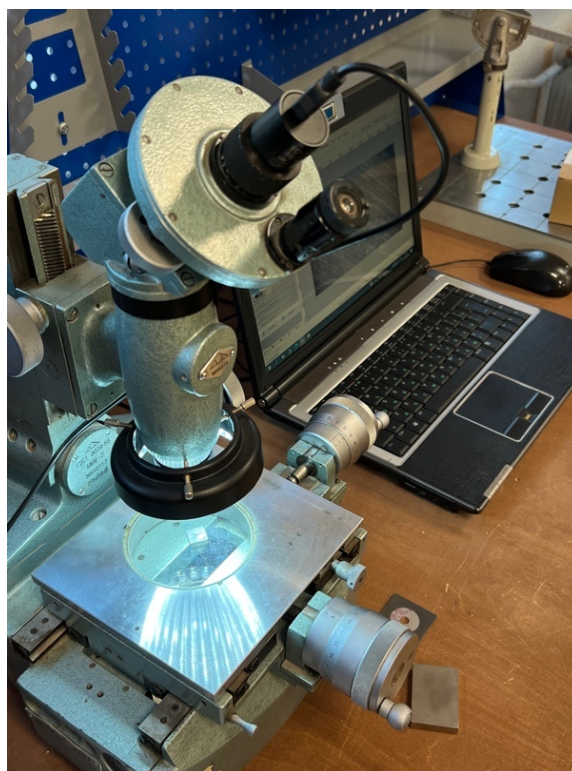


Рисунок 3.4 – Микроскоп MarVision
MM320

Анализ радиуса скругления режущих кромок керамических режущих пластин марки ВОК-60 осуществлялся с использованием профилографа-профилометра *Hommel Tester T8000*. Процесс измерения величины скругления режущей кромки представлен на рисунке 3.5. Последующая обработка результатов находится на рисунке 3.6.

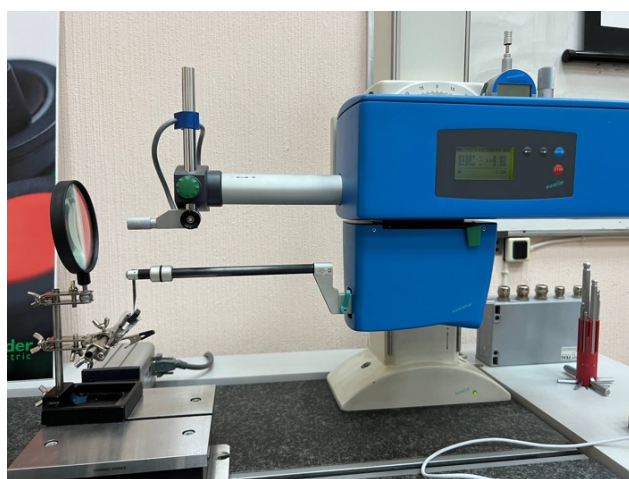
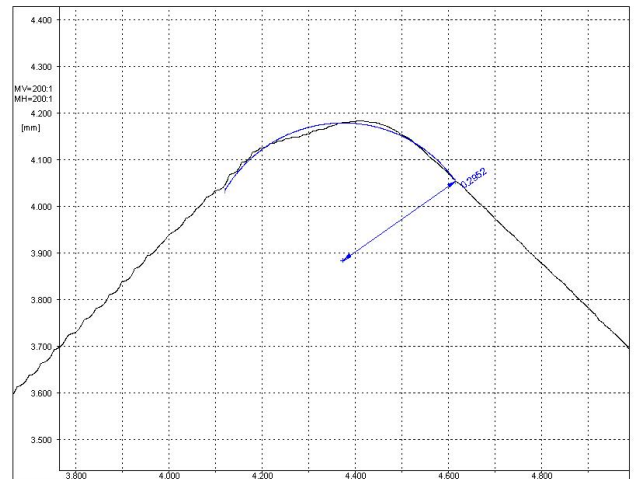


Рисунок 3.5 – Измерение скругления режущей кромки на профилограф-
профилометре *Hommel Tester T8000*



а)



б)

Рисунок 3.6 – Обработка результатов измерения, где: а) радиус скругления режущей кромки до МАО, б) радиус скругления режущей кромки после МАО

3.2 Разработка математической модели исследуемого объекта в виде уравнения множественной регрессии второго порядка с помощью рототабельного центрального композиционного планирования (РЦКП)

Проведение экспериментальных исследований и оценка полученных результатов основывалась на методиках планирования эксперимента [43; 44; 63]. Выбранная методика планирования и проведения экспериментального исследования с использованием РЦКП позволяет сформировать математическое представление отклика исследуемого объекта в виде полного полинома второй степени, а также разработать степенную математическую модель отклика и оценить ее адекватность.

РЦКП позволяет получить модель, которая способна предсказать значение отклика с одинаковой дисперсией во всех точках, равноудаленных от центра, факторного пространства [44]. В итоге, варьируемые параметры эксперимента в заданном диапазоне принимают верхнее и нижнее значения, а также значения в «звездных точка» (согласно матрице планирования эксперимента) (Таблица 3.5).

Общая модель второго порядка имеет вид (3.2):

$$\eta = \beta_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} \beta_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} \beta_{ii} x_i^2, \quad (3.2)$$

где η – истинная величина отклика;

$\beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$ – истинные значения коэффициентов;

k – число факторов.

Число членов этой модели (3.3):

$$C_{k+2}^k = \frac{(k+2)!}{k!2!} = \frac{(k+1)(k+2)}{2}. \quad (3.3)$$

Поэтому число опытов N для ее построения должно быть не меньше (3.4):

$$N \geq \frac{(k+1)(k+2)}{2}. \quad (3.4)$$

Кроме того, возникает необходимость варьирования каждого фактора не менее чем на трех уровнях.

По результатам опытов рассчитываются выборочные оценки коэффициентов модели (3.2) и строится уравнение регрессии (3.5):

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i \leq j \leq k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2. \quad (3.5)$$

Применение метода РЦКП характеризуется получением более точного математического описания. Высокая точность обеспечивается увеличенным числом опытов в центре плана, а также выбором значения «звездного плеча» α .

Для определения числа проводимых опытов в РЦКП используется формула (3.6):

$$N = N_{\text{я}} + 2k + N_0, \quad (3.6)$$

где $N_{\text{я}}$ – число проводимых опытов в ядре плана $N_{\text{я}} = 2^k$;

k – число варьируемых факторов в эксперименте;

$2k$ – число опытов в «звездных точках», имеющих координаты:

$$\begin{vmatrix} \pm\alpha, & 0, & 0, & \dots & 0 \\ 0, & \pm\alpha, & 0, & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0, & 0, & 0, & \dots & \pm\alpha \end{vmatrix}$$

N_0 – число проводимых опытов в центре плана с координатами $(0, 0, \dots, 0)$.

Ядром плана является полнофакторный эксперимент.

Для проведения экспериментальных исследований, включающих факторов $k = 4$, число опытов в ядре плана составит $N_{\text{я}} = 8$, в «звездных точках» – $2k = 8$, в центре плана $N_0 = 7$, а общее число опытов равняется $N = 31$.

Равное расстояние от центра до всех экспериментальных точек, характеризующее ротатабельность плана, обеспечивает точность предсказаний значений отклика исследуемого объекта и достигается выбором значений «звездного плеча» из условий (3.7 и 3.8):

$$\alpha = 2^{k/4} \text{ при } k < 5. \quad (3.7)$$

$$\alpha = 2^{(k-1)/4} \text{ при } k \geq 5. \quad (3.8)$$

Исходя из количества факторов $k = 4$, получаем значение звездного плеча $\alpha = 2$.

По итогам проведенных вычислений получаем характеристики РЦКП, которые станут основой для построения матрицы планирования эксперимента (Таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Характеристики РЦКП

Число факторов k	Число опытов в ядре плана, $N_{\text{я}}$	Величина «звездного плеча», α	Число опытов в «звездных точках», $2k$	Число опытов в центре плана, N_0	Общее число опытов
4	2^4 (ПФЭ)	2,000	8	7	N

Производим кодирование натуральных значений варьируемых факторов обработки. Кодированные значения связываются с натуральным масштабом соотношением (3.9):

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (3.9)$$

где X_{i0} – основной уровень фактора, принимающий значения в центре плана;
 ΔX_i – интервал варьирования значения фактора.

В проводимых экспериментах по влиянию магнитно-абразивной обработки на формирование шероховатости поверхности керамических пластин ВОК-60 и радиус скругления режущей кромки в качестве исследуемых варьируемых

параметров были выбраны магнитная индукция B , время обработки $t_{\text{мао}}$, частота вращения $n_{\text{в.мао}}$ и продольная подача $S_{\text{п.мао}}$.

Выбранные факторы для проведения экспериментальных исследований, диапазон значений, которые могут принимать эти факторы, и установленные уровни представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Установленные уровни варьируемых факторов

Факторы	Магнитная индукция B, Тл	Время обработки $t_{\text{мао}}$, мин	Частота вращения $n_{\text{в.мао}}$, мин⁻¹	Скорость подачи $S_{\text{п.мао}}$, мм/мин
Основной уровень (X_{i0})	0,65	8	350	125
Интервал варьирования (ΔX_i)	0,15	2	125	50
Верхний уровень ($x_i = +1$)	0,8	10	475	175
Нижний уровень ($x_i = -1$)	0,5	6	225	75
Звездная точка $+\alpha$ ($x_i = 2$)	0,95	12	600	225
Звездная точка $-\alpha$ ($x_i = -2$)	0,35	4	100	25

Проведение экспериментальных исследований согласно составленной матрице планирования РЦКП (Таблица 3.5) позволяет определить значения коэффициентов уравнения регрессии (3.5) и в дальнейшем составить обобщающие полиномиальные модели. Эти модели описывают влияние технологических параметров магнитно-абразивной обработки на шероховатость поверхностей R_a и радиус скругления режущей кромки ρ .

Составленные модели позволяют заранее спрогнозировать получаемый результат обработки и за счет выбора оптимальных значений варьируемых параметров добиться высокого качества обработки изделия.

Таблица 3.5 – Матрица РЦКП для четырех факторов

Системы опытов	Номер опыта	Натуральные значения факторов				Кодовые значения факторов				
		B , Тл	$t_{\text{мао}}$, МИН	$n_{\text{в.мао}}$, МИН ⁻¹	$S_{\text{п.мао}}$, ММ/МИН	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4
ПФЭ	1	0,8	10	475	175	+1	+1	+1	+1	+1
	2	0,5	10	475	175	+1	-1	+1	+1	+1
	3	0,8	6	475	175	+1	+1	-1	+1	+1
	4	0,5	6	475	175	+1	-1	-1	+1	+1
	5	0,8	10	225	175	+1	+1	+1	-1	+1
	6	0,5	10	225	175	+1	-1	+1	-1	+1
	7	0,8	6	225	175	+1	+1	-1	-1	+1
	8	0,5	6	225	175	+1	-1	-1	-1	+1
	9	0,8	10	475	75	+1	+1	+1	+1	-1
	10	0,5	10	475	75	+1	-1	+1	+1	-1
	11	0,8	6	475	75	+1	+1	-1	+1	-1
	12	0,5	6	475	75	+1	-1	-1	+1	-1
	13	0,8	10	225	75	+1	+1	+1	-1	-1
	14	0,5	10	225	75	+1	-1	+1	-1	-1
	15	0,8	6	225	75	+1	+1	-1	-1	-1
	16	0,5	6	225	75	+1	-1	-1	-1	-1
Опыт в «звездных точка»	17	0,95	8	350	125	+1	+2	0	0	0
	18	0,35	8	350	125	+1	-2	0	0	0
	19	0,65	12	350	125	+1	0	+2	0	0
	20	0,65	4	350	125	+1	0	-2	0	0
	21	0,65	8	600	125	+1	0	0	+2	0
	22	0,65	8	100	125	+1	0	0	-2	0
	23	0,65	8	350	225	+1	0	0	0	+2
	24	0,65	8	350	25	+1	0	0	0	-2
Опыт в центре плана	25	0,65	8	350	125	+1	0	0	0	0
	26	0,65	8	350	125	+1	0	0	0	0
	27	0,65	8	350	125	+1	0	0	0	0
	28	0,65	8	350	125	+1	0	0	0	0
	29	0,65	8	350	125	+1	0	0	0	0
	30	0,65	8	350	125	+1	0	0	0	0
	31	0,65	8	350	125	+1	0	0	0	0

Условный фактор $x_0 = +1$ при коэффициенте b_0 приведен в таблице 3.5.

Полученные результаты в процессе экспериментальных исследований подвергаются статистической обработке. В ходе обработки результатов определяются коэффициенты уравнения регрессии, а также устанавливаются адекватности гипотез в следующем порядке:

1. Проведение расчета коэффициентов модели по формулам (3.10-3.13) с использованием констант из таблицы А.3 (приложение А). Константы выбираются в зависимости от номера плана и числа опытов.

$$b_0 = c_1 \sum_{u=1}^N y_u - c_2 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u, \quad (3.10)$$

$$b_i = c_3 \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u, \quad (3.11)$$

$$b_{ij} = c_4 \sum_{u=1}^N (x_i x_j)_u y_u, \quad (3.12)$$

$$b_{ii} = c_5 \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u + c_6 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u - c_2 \sum_{i=1}^k y_u, \quad (3.13)$$

где N – общее число опытов эксперимента;

k – количество факторов;

y_u – экспериментальное значение в u -м опыте;

x_i, x_j – значение факторов в i -м и j -м столбце.

2. Оценка дисперсии воспроизводимости S_y^2 можно найти на основании результатов опыта, проведенных в центре плана. Для этого вычисляется среднее значение \bar{y} (3.14):

$$\bar{y} = \frac{1}{N_0} \sum_{j=1}^{n_0} y_j, \quad (3.14)$$

тогда получаем уравнение (3.15):

$$S_y^2 = \frac{1}{N_0 - 1} \sum_{j=1}^{n_0} (y_j - \bar{y})^2. \quad (3.15)$$

Эта величина найдена для числа степеней свободы $f = N_0 - 1$.

3. Для определения полученных отклонений выходного параметра эксперимента от его среднего значения проводится вычисление дисперсии S_b (3.16-3.23) всех коэффициентов уравнения планируемой модели, а также определяется значение ковариации cov_{bb} (3.24, 3.25):

$$S_{b_0}^2 = c_1 S_y^2, \quad (3.16)$$

$$S_{b_0} = c_7 S_y, \quad (3.17)$$

$$S_{b_j}^2 = c_3 S_y^2, \quad (3.18)$$

$$S_{b_j} = c_8 S_y, \quad (3.19)$$

$$S_{b_{ij}}^2 = c_4 S_y^2, \quad (3.20)$$

$$S_{b_{ij}} = c_9 S_y, \quad (3.21)$$

$$S_{b_{jj}}^2 = (c_5 + c_6) S_y^2, \quad (3.22)$$

$$S_{b_{jj}} = c_{10}S_y, \quad (3.23)$$

$$\text{cov}_{b_0b_{ii}} = -c_2S_y^2, \quad (3.24)$$

$$\text{cov}_{b_{ii}b_{jj}} = c_6S_y^2, \quad (3.25)$$

где S_y^2 – дисперсия воспроизводимости эксперимента;

S_y – среднеквадратичное отклонение;

$c_1 - c_{10}$ – вспомогательные константы.

4. Определение статической значимости коэффициентов уравнения производится с учетом сравнения абсолютной величины коэффициента с его доверительным интервалом, рассчитываемым по следующей формуле (3.26):

$$\Delta b_i = t_{a;f_1} \cdot S_{b_i}, \quad (3.26)$$

где $t_{a;f_1}$ – значение критерия Стьюдента, определяется по таблице А.1 (приложение А). При выборе значения учитывается выбранный уровень значимости a и число степеней свободы f_1 при определении дисперсии опыта S_y^2 ;

S_{b_i} – среднеквадратичная ошибка коэффициента регрессии.

Уровень значимости $a = 0,05$. Значение критерия $t_{a;f_1} = 2,45$.

Коэффициент уравнения можно считать статически значимым только в том случае, если его абсолютная величина b_i больше доверительного интервала или совпадает с ним, т.е. соответствует следующим неравенствам (3.27-3.30):

$$|b_0| \geq t_{a;f_1} \cdot S_{b_0}, \quad (3.27)$$

$$|b_i| \geq t_{a;f_1} \cdot S_{b_i}, \quad (3.28)$$

$$|b_{ii}| \geq t_{a;f_1} \cdot S_{b_{ii}}, \quad (3.29)$$

$$|b_{ij}| \geq t_{a;f_1} \cdot S_{b_{ij}}. \quad (3.30)$$

5. Дисперсия неадекватности модели проверяется по формуле (3.31):

$$SS_{\text{неад}}^2 = \frac{SS_{\text{неад}}}{f_2}, \quad (3.31)$$

где $SS_{\text{неад}}$ – сумма квадратов, связанная с дисперсией неадекватности;

f_2 – число степеней свободы.

Согласно плану проведения экспериментальных исследований производилось дублирование одного опыта в центре плана. Соответственно, сумму квадратов, связанную с дисперсией неадекватности, можно рассчитать по следующей формуле (3.32):

$$SS_{\text{неад}} = N_0(y_0^p - \bar{y}_0)^2 + \sum_{u=1}^{24}(y_u^p - y_u^a)^2, \quad (3.32)$$

где N_0 – количество опытов, проводимых в центре плана;

y_0^p, \bar{y}_0 – расчётное и среднее значения из опытов в центре плана;

y_u^p, y_u^a – значение опыта, рассчитанное по уравнению регрессии и экспериментально.

Число степеней свободы, связанное с оценкой дисперсии (3.33):

$$f_2 = N - \frac{(k+2)(k+1)}{2}, \quad (3.33)$$

где N – число опытов;

k – число факторов в эксперименте.

6. Проверка адекватности полученной модели проводится по F-критерию Фишера, который определяется по формуле (3.34):

$$F_p = \frac{SS_{\text{неад}}^2}{S_y^2}. \quad (3.34)$$

Полученное расчетное значение F-критерия сравнивается со значением из таблицы А.2 (Приложение А). По результатам сравнения делается вывод об адекватности модели. Адекватность модели подтверждается при соблюдении неравенства $F_p < F_{\text{табл}}$.

3.3 Влияние магнитно-абразивной обработки на шероховатость поверхности керамических режущих пластин

Метод магнитно-абразивной обработки с использованием оптимальных технологических параметров снижает шероховатость поверхности заготовки в 6-8 раз. В процессе производимой обработки удаляется дефектный слой, загрязнения и нивелируются следы технологической наследственности предыдущей обработки.

Коэффициенты модели рассчитывают с использованием формул (3.10-3.13). Их дисперсии и ковариации определяются по формулам (3.16-3.25). Оценка значимости коэффициентов модели определяется по формуле (3.26) при $t = 2,45$, методом сравнения абсолютной величины с расчетным значением. Значение общей дисперсии опыта устанавливается по значению в центре плана с использованием формулы (3.15). Среднее арифметическое значение всех проводимых дублей центрального опыта $\bar{y} = 0,234142857$. Результаты экспериментальных исследований с последующим анализом представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты расчетов коэффициентов регрессионного уравнения шероховатости

Коэффициент	Значение	Среднее значение \bar{y}	Дисперсия опыта S_y^2	Дисперсия коэффициента, S_b^2	Средне-квадратичная ошибка, S_b	Доверительный интервал
b_0	0,234	0,23414285 7	0,00013147 6	0,000018784	0,00433403	0,010618385
b_1	0,001			0,00000548	0,002340617	0,005734512
b_2	0,013					
b_3	-0,012			0,00000822	0,002866577	0,007023113
b_4	-0,033					
b_{12}	-0,015					
b_{13}	-0,009			0,00000460	0,002144429	0,00525385
b_{14}	0,016					
b_{23}	0,024			0,00000460	0,002144429	0,00525385
b_{24}	-0,018					
b_{34}	0,019					
b_{11}	0,025					
b_{22}	-0,003			0,00000460	0,002144429	0,00525385
b_{33}	-0,031					
b_{44}	-0,002					

Подставив рассчитанные значения коэффициентов в уравнение (3.2) получаем уравнение регрессии (3.35):

$$\begin{aligned}
 y_{Ra} = & 0,234 + 0,001x_1 + 0,013x_2 - 0,012x_3 - 0,033x_4 - 0,015x_1x_2 - \\
 & 0,009x_1x_3 + 0,016x_1x_4 + 0,024x_2x_3 - 0,018x_2x_4 + 0,019x_3x_4 + \\
 & 0,025x_{11} - 0,003x_{22} - 0,031x_{33} - 0,002x_{44}.
 \end{aligned} \quad (3.35)$$

После составления уравнения регрессии (3.35) проводится проверка адекватности модели. Для этого вычисляются расчетные значения отклика.

Стоит обратить внимание, что при определении значений отклика, значения x_i имеют закодированные значения. Для расчета значения отклика n -го опыта необходимо произвести раскодирование значений с учетом таблицы 3.6. Например, для вычисления значений отклика 2-го опыта закодированные значения будут принимать вид: $x_1 = -1$, $x_2 = +1$, $x_3 = +1$, $x_4 = +1$, $x_1x_2 = -1$, $x_1x_3 = -1$, $x_1x_4 = -1$, $x_2x_3 = +1$, $x_2x_4 = +1$, $x_3x_4 = +1$, $x_{11} = +1$, $x_{22} = +1$, $x_{33} = +1$, $x_{44} = +1$. Из этого получаем расчетное значение шероховатости для 2-го опыта (3.36) путем подстановки раскодированных значений в уравнение (3.35).

$$y_{Ra} = 0,234 - 0,001 + 0,013 - 0,012 - 0,033 + 0,015 + 0,009 - 0,016 + 0,024 - 0,018 + 0,019 + 0,025 - 0,003 - 0,031 - 0,002 = 0,223. \quad (3.36)$$

Рассчитанные для каждого номера опыта значения отклика представлены в таблице 3.8. С использованием данных этой таблицы производится определение дисперсии неадекватности по формуле (3.31).

В результате вычислений получаем расчетное значение в центре плана $y_{0 \text{ расч}} = 0,234142857$. Среднеквадратичная ошибка в центре плана $SS_{\text{неад } 0} = 0,028574642$. Определение числа степеней свободы осуществляется из расчета оставленных коэффициентов. В данном случае при составлении уравнения (3.5) использовалось десять коэффициентов, следовательно, $f_2 = 20$. Дисперсия неадекватности модели: $SS_{\text{неад}}^2 = 0,00142874$.

Адекватность составленной модели проходит проверку по F-критерию Фишера, который вычисляется по формуле (3.34). По результатам вычислений получаем $F_{\text{расч.}} = 0,01552607$. Табличное значение при $\alpha = 0,05$: $F_{\text{табл } 0,05; 4; 26} = 2,742$. По результатам сравнения расчетного значения и табличного выполняется неравенство $F_{\text{расч.}} < F_{\text{табл.}}$. Значит полученная математическая модель для оценки шероховатости поверхности R_a адекватна.

Таблица 3.8 – Экспериментальные и расчетные значения отклика уравнения шероховатости

Номер опыта	R_a экс.	R_a расч.	Δy_{Ra}^2	Номер опыта	R_a экс.	R_a расч.	Δy_{Ra}^2
1	0,155	0,20873659	0,00288762	13	0,286	0,27107703	0,00022270
2	0,208	0,22398647	0,00025557	14	0,279	0,31382691	0,00121291
3	0,226	0,20131791	0,00060921	15	0,295	0,28915835	0,00003412
4	0,112	0,15556779	0,00189815	16	0,296	0,27090823	0,00062960
5	0,113	0,16398843	0,00259982	17	0,347	0,33394753	0,00017037
6	0,171	0,14173831	0,00085625	18	0,355	0,33094729	0,00057853
7	0,277	0,25406975	0,00052580	19	0,296	0,24861609	0,00224523
8	0,133	0,17081963	0,00143032	20	0,188	0,19827873	0,00010565
9	0,268	0,24032519	0,00076590	21	0,132	0,08744557	0,00198510
10	0,269	0,32057507	0,00265999	22	0,126	0,13344925	0,00005549
11	0,103	0,16090651	0,00335316	23	0,202	0,15960881	0,00179701
12	0,221	0,18015639	0,00166820	24	0,286	0,29128601	0,00002794
Σ						0,028574642	

После доказательства адекватности полученной математической модели (3.35) производится ее раскодирование. Окончательная раскодированная модель имеет вид (3.37):

$$\begin{aligned}
 R_a = & 0,485 - 1,136B + 1,11B^2 + 0,457 \cdot 10^{-3}n_{в.мао} - 0,048 \cdot \\
 & 10^{-2}Bn_{в.мао} - 0,198 \cdot 10^{-5}n_{в.мао}^2 - 0,147 \cdot 10^{-2}S_{п.мао} + 0,213 \cdot \\
 & 10^{-2}BS_{п.мао} + 0,304 \cdot 10^{-5}n_{в.мао}S_{п.мао} - 8 \cdot 10^{-7}S_{п.мао}^2 + 0,04t_{мао} - \\
 & 0,05Bt_{мао} + 0,96 \cdot 10^{-4}n_{в.мао}t_{мао} - 0,18 \cdot 10^{-3}S_{п.мао}t_{мао} - 0,75 \cdot \\
 & 10^{-3}t_{мао}^2.
 \end{aligned} \quad (3.37)$$

В результате проведенных исследований и последующей обработки полученных данных составлены полиномиальные модели. Использование полученных моделей позволяет оценить влияние магнитной индукции B , времени обработки $t_{мао}$, частоты вращения $n_{в.мао}$ и продольной подачи $S_{п.мао}$ заготовки на шероховатость поверхностей керамических режущих пластин R_a .

Математическое описание полученных моделей представлено в таблице 3.9, а их графическая интерпретация на рисунке 3.7.

Таблица 3.9 – Обобщающие полиномиальные модели, описывающие влияния магнитно-абразивной обработки на шероховатость R_a

Варьируемый параметр	Обобщающая полиномиальная модель
Магнитная индукция B , Тл	$R_a = 0,699 - 1,44B + 1,11B^2$
Время обработки $t_{\text{мао}}$, мин	$R_a = 0,134 + 1,85 \cdot 10^2 t_{\text{мао}} - 0,75 \cdot 10^{-3} t_{\text{мао}}^2$
Частота вращения $n_{\text{в.мао}}$, мин ⁻¹	$R_a = 0,025 + 1,29 \cdot 10^{-3} n_{\text{в.мао}} - 1,984 \cdot 10^{-6} n_{\text{в.мао}}^2$
Продольная подача $S_{\text{п.мао}}$, мм/мин	$R_a = 0,304 - 0,46 \cdot 10^{-3} S_{\text{п.мао}} - 8 \cdot 10^{-7} S_{\text{п.мао}}^2$

Анализ обобщающей полиномиальной функции влияния на шероховатость поверхности керамических режущих пластин марки ВОК-60 от величины электромагнитной индукции B (рисунок 3.7, а) показал, что изменение величины индукции в диапазоне от 0,35 до 0,65 Тл сопровождается улучшением шероховатости R_a от начального значения 0,33 до 0,21 мкм. С дальнейшим увеличением величины электромагнитной индукции от 0,65 до 0,95 Тл значение параметра шероховатости возрастает с 0,21 до 0,33 мкм.

Увеличение электромагнитной индукции приводит к повышению жесткости магнитно-абразивного инструмента марки «АЛВОПОЛ» на основе алмаза АСМ 7/5, что отрицательно сказывается на шероховатости поверхности режущих керамических пластин R_a .

Обобщающая полиномиальная функция влияния на шероховатость поверхности керамических режущих пластин марки ВОК-60 от времени обработки $t_{\text{мао}}$ (рисунок 3.7, б) показала, что изменение времени в диапазоне от 4 до 12 мин сопровождается ухудшением шероховатости R_a от начального значения 0,19 до 0,23 мкм. Процесс магнитно-абразивной обработки при времени обработки $t_{\text{мао}} > 12$ мин не изучен в исследовании. Прослеживаемая тенденция при дальнейшей обработке демонстрирует снижение шероховатости R_a , но значения и пределы не известны.

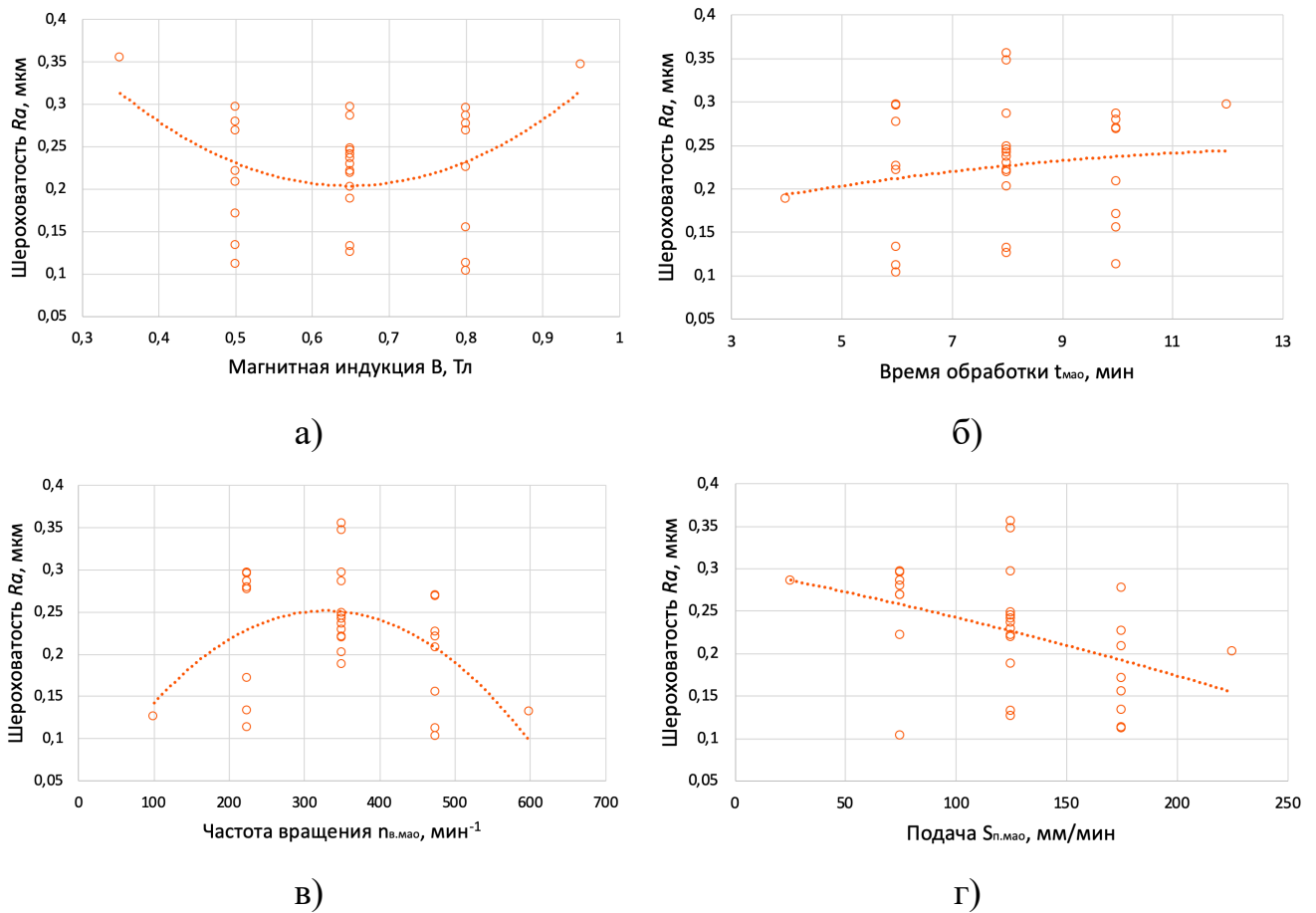


Рисунок 3.7 – Графики полиномиальной регрессии а) магнитной индукции, б) времени обработки, в) частоты вращения, г) продольной подачи на шероховатость R_a , мкм при обработке керамических режущих пластин марки ВОК-60

Обобщающая полиномиальная функция влияния на шероховатость поверхности керамических режущих пластин марки ВОК-60 от частоты вращения $n_{в.мао}$ (рисунок 3.7, в) показала, что изменение частоты вращения в диапазоне от 100 до 320 мин⁻¹ сопровождается ухудшением шероховатости R_a от начального значения 0,13 до 0,24 мкм. С дальнейшим увеличением частоты вращения от 320 до 600 мин⁻¹ значение параметра шероховатости снижается с 0,24 до 0,08 мкм. Процесс магнитно-абразивной обработки при частоте вращения $n_{в.мао} > 600$ мин⁻¹ не изучен в исследовании. Прослеживаемая тенденция при дальнейшей обработке демонстрирует снижение шероховатости R_a , но значения и пределы не известны.

Обобщающая полиномиальная функция влияния на шероховатость поверхности керамических режущих пластин марки ВОК-60 от величины подачи

$S_{п.мао}$ (рисунок 3.7, г) показала, что изменение продольной подачи в диапазоне от 25 до 225 мм сопровождается улучшением шероховатости R_a от начального значения 0,29 до 0,16 мкм. Линейная тенденция снижения шероховатости от величины подачи изучена в значениях $S_{п.мао} < 225$ мм, но дальнейшие значения и пределы при увеличении подачи не известны.

Анализ графических взаимозависимостей параметров магнитно-абразивной обработки на шероховатость поверхности керамических режущих пластин марки ВОК-60 представлен на рисунке 3.8. По результатам анализа взаимозависимостей можно сделать следующие выводы:

1. Время обработки $t_{мао}$ оказывает значительное влияние на процесс микрорезания при обработке поверхности пластин и имеет нелинейную зависимость. При совместном исследовании времени обработки и величины электромагнитной индукции наблюдается повышение шероховатости поверхности R_a при значении $B < 0,4$ Тл. В диапазоне от 0,4 до 0,8 Тл при одновременном увеличении времени обработки шероховатость поверхности изменяется от 0,2 до 0,3 мкм, но с последующим увеличением индукции B до 0,95 Тл параметр шероховатости снижается до 0,35 мкм. Наилучшая шероховатость поверхности керамических пластин марки ВОК-60 достигается при соблюдении следующего диапазона параметров: времени обработки $t_{мао}$ от 4 до 6 мин и электромагнитной индукции B от 0,4 до 0,75 Тл.

2. При исследовании совместного влияния времени обработки и величины подачи значение шероховатости R_a претерпевает относительно малые изменения и находится в диапазоне от 0,2 до 0,25 мкм, но в то же время величина продольной подачи $S_{п.мао}$ оказывает значительное влияние на процесс магнитно-абразивной обработки керамических режущих пластин.

3. При исследовании совместного влияния времени обработки и частоты вращения значение шероховатости R_a изменяется в диапазоне от 0,08 до 0,27 мкм. Наилучшие показатели шероховатости достигаются при двух условиях: высокой частоте вращения от 500 до 600 мин⁻¹ и непродолжительном процесс обработки от 4 до 6 мин, а также малом значении параметра частоты вращения от 100 до 200 мин⁻¹ и длительном процессе обработки от 10 до 12 мин.

4. На процесс магнитно-абразивной обработки керамических режущих пластин также значительное влияние оказывает величина электромагнитной индукции B . При совместном исследовании индукции и величины подачи шероховатость R_a изменяется следующим образом: увеличение подачи от 25 до 225 мм/мин линейно снижает шероховатость со значений 0,6 до 0,19 мкм, также наблюдается снижение шероховатости при увеличении электромагнитной индукции до 0,7 Тл. При значении параметра $B > 0,7$ Тл шероховатость R_a снижается до 0,3 мкм.

5. При исследовании совместного влияния магнитной индукции и частоты вращения, наблюдается наилучшая шероховатость R_a при средних значениях варьируемого параметра B и максимальном или минимальном значениях $n_{в.мао}$ в выбранном диапазоне исследования. Оптимальное значение электромагнитной индукции находится в диапазоне от 0,4 до 0,8 Тл при значениях частоты вращения в двух диапазонах от 100 до 150 мин⁻¹ и от 500 до 600 мин⁻¹, что позволяет снизить шероховатость R_a с 0,4 до 0,2 мкм.

6. Исследование совместного воздействия параметров частоты вращения $n_{в.мао}$ и величины продольной подачи $S_{п.мао}$ продемонстрировало слабое влияние на снижение шероховатости R_a , которое при проводимом исследовании уменьшается с 0,24 до 0,21 мкм.

Таким образом, в исследуемом диапазоне варьируемых параметров при описанных условиях и параметрах исследования достигается минимальное значение параметра R_a при следующих значениях: $B = 0,6-0,8$ Тл, $t_{мао} = 4-6$ мин, $n_{в.мао} = 500-600$ мин⁻¹ и $S_{п.мао} = 100-150$ мм/мин.

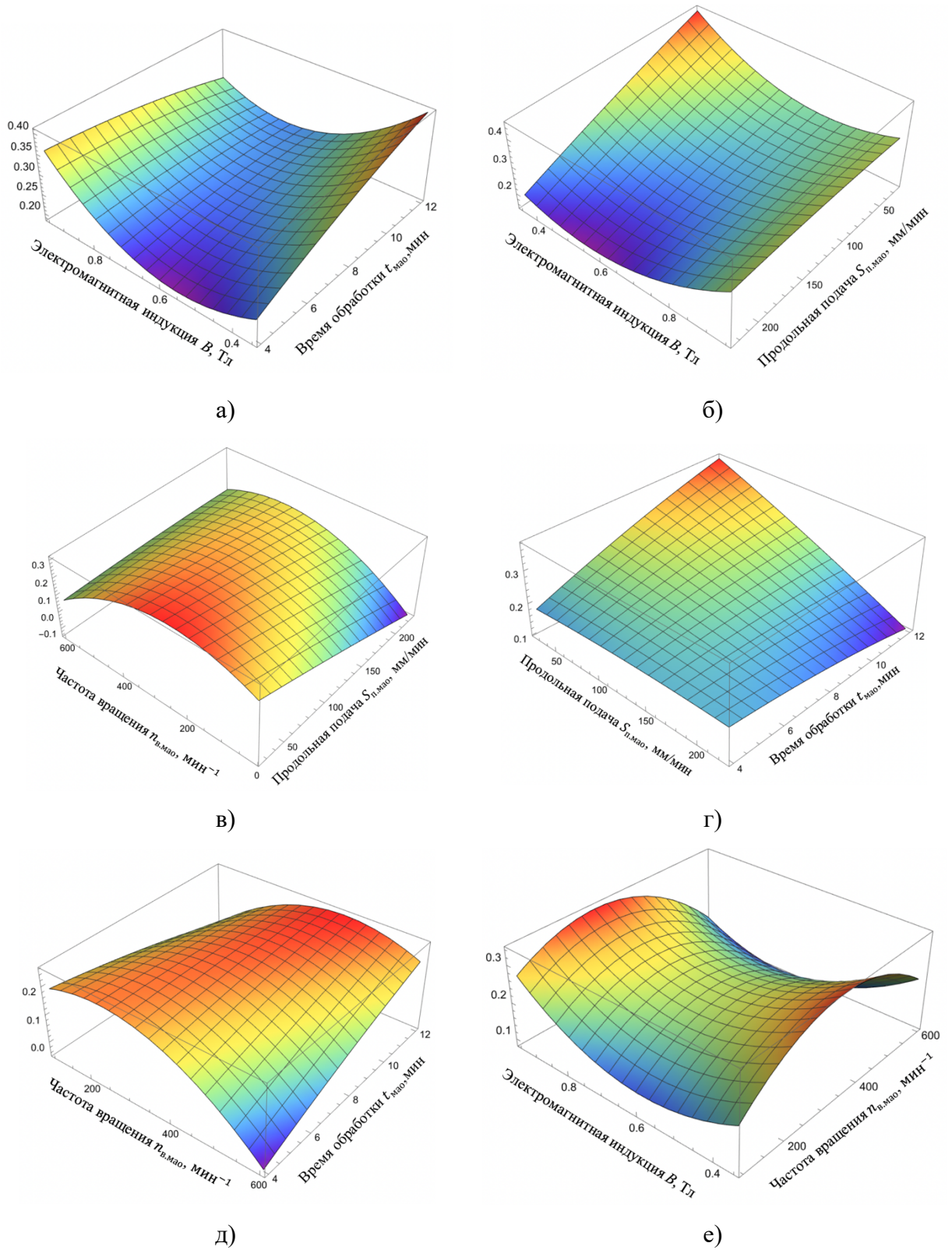


Рисунок 3.8 – Комбинированное влияние на шероховатость поверхности R_a : а) времени обработки и величины электромагнитной индукции; б) продольной подачи и величины электромагнитной индукции; в) продольной подачи и частоты вращения; г) продольной подачи и времени обработки; д) частоты вращения и времени обработки; е) частоты вращения и величины электромагнитной индукции

3.4 Влияние технологических факторов магнитно-абразивного метода на производительность процесса обработки керамических режущих пластин

Оценка производительности магнитно-абразивной обработки керамических режущих пластин определялась массой снятого материала с единицы площади. Для расчета массы снятого материала проводились контрольные взвешивания до и после магнитно-абразивной обработки. Стоит отметить, что использование данного способа сопряжено с высокой погрешностью измерений в связи с малой толщиной снимаемого слоя материала и возникающими температурными деформациями заготовки.

Производительность магнитно-абразивной обработки определялась по значению удельного съема материала q мг/см² (3.38):

$$q = \frac{Q}{S}, \quad (3.38)$$

где Q – масса снятого с поверхности материала, получаемая из разницы масс до обработки Q_d и после магнитно-абразивной обработки Q_p ;

S – площадь обрабатываемой поверхности, см².

Расчет массы снятия материала в процессе магнитно-абразивной обработки представлен в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Масса снятия материала с поверхности пластин ВОК-60

Номер опыта	Q_d , г	Q_p , г	Q , г	Номер опыта	Q_d , г	Q_p , г	Q , г
1	3,275	3,127	0,148	17	3,281	3,102	0,179
2	3,273	3,183	0,90	18	3,178	3,087	0,91
3	3,266	3,158	0,108	19	3,222	3,085	0,137
4	3,281	3,197	0,84	20	3,265	3,178	0,87
5	3,252	3,155	0,97	21	3,262	3,109	0,153
6	3,254	3,198	0,56	22	3,257	3,195	0,62
7	3,277	3,187	0,90	23	3,244	3,132	0,112
8	3,215	3,124	0,91	24	3,282	3,185	0,97
9	3,268	3,101	0,167	25	3,239	3,154	0,85
10	3,228	3,145	0,83	26	3,246	3,162	0,84
11	3,256	3,157	0,99	27	3,221	3,133	0,88
12	3,271	3,169	0,102	28	3,282	3,202	0,80
13	3,281	3,157	0,124	29	3,265	3,184	0,81
14	3,277	3,203	0,74	30	3,277	3,188	0,89
15	3,245	3,183	0,62	31	3,256	3,172	0,84
16	3,231	3,177	0,54	-	-	-	-

Площадь обрабатываемой поверхности керамической пластины имеет прямой контакт с магнитной-абразивным инструментом $S = 2,4 \text{ см}^2$. Тогда, удельный съём материала будет находиться в диапазоне от $0,0258-0,0745 \text{ г/см}^2$.

Полученные результаты в ходе исследования удельного съёма материала с единицы площади в зависимости от варьируемых параметров магнитно-абразивной обработки представлены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Результаты исследования по определению удельного съёма материала с единицы площади q , г/см^2

Опыт	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	x_1^2	x_2^2	x_3^2	x_4^2	q
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	1	1	1	1	0,0617
2	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	1	1	1	1	0,0375
3	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	1	1	1	1	0,045
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	1	1	1	1	0,035
5	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	1	1	1	1	0,0404
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	1	1	1	1	0,0233
7	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	1	1	1	1	0,0375
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	1	1	1	1	0,0379
9	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	1	1	1	1	0,0695
10	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	1	1	1	1	0,0345
11	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	1	1	1	1	0,0412
12	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	1	1	1	1	0,0425
13	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	1	1	1	1	0,0516
14	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	1	1	1	1	0,0308
15	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	1	1	1	1	0,0258
16	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	1	1	1	1	0,0225
17	+1	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0,0745
18	+1	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0,0379
19	+1	0	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0,0570
20	+1	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0,0362
21	+1	0	0	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0,0637
22	+1	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0,0258
23	+1	0	0	0	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0,0466
24	+1	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0,0404
25	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0354
26	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,035
27	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0366
28	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0333
29	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0337
30	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0370
31	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,035

Исследования проводились согласно методике, описанной в разделе 3.2. Дальнейшие расчеты и обработка полученных результатов производилась по методике из раздела 3.3. Рассчитанные таким образом коэффициенты уравнения

регрессии, дисперсия опыта, дисперсия коэффициента, среднеквадратичная ошибка и доверительный интервал представлены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Результаты расчета уравнения регрессии удельного съема материала с единицы площади

Коэффициент	Значение	Среднее значение \bar{y}	Дисперсия опыта S_y^2	Дисперсия коэффициента, S_b^2	Среднеквадратичная ошибка, S_b	Доверительный интервал	
b_0	0,03521	0,035178571	$1,9 \cdot 10^{-6}$	0,00000027 17	0,00052121	0,001276962	
b_1	0,00759			0,00000008	0,000281482	0,00068963	
b_2	0,00432						
b_3	0,00721						
b_4	0,00050			0,00000012	0,000344733	0,000844596	
b_{12}	0,00534						
b_{13}	0,00169						
b_{14}	-0,00044						
b_{23}	0,00107			0,00000007	0,000257888	0,000631826	
b_{24}	-0,00294						
b_{34}	-0,00107						
b_{11}	0,00394						
b_{22}	0,00154						
b_{33}	0,00108						
b_{44}	0,00076						

В результате подстановки коэффициентов в уравнение (3.2) получаем следующее уравнение регрессии (3.39):

$$\begin{aligned}
 y_q = & 0,03521 + 0,00759x_1 + 0,00432x_2 + 0,00721x_3 + 0,0005x_4 + \\
 & 0,00534x_1x_2 + 0,00169x_1x_3 - 0,00044x_1x_4 + 0,00107x_2x_3 - \\
 & 0,00294x_2x_4 - 0,00107x_3x_4 + 0,00394x_{11} + 0,00154x_{22} + \\
 & 0,00108x_{33} + 0,00076x_{44}.
 \end{aligned} \tag{3.39}$$

Значения отклика, рассчитанные согласно уравнению (3.39), представлены в таблице 3.13. Значения из таблицы применялись для расчета дисперсии неадекватности по формуле (3.31). Расчетное значение в центре плана $y_{0 \text{ расч}} = 0,035178571$. Среднеквадратичная ошибка в центре плана $SS_{\text{неад } 0} = 0,00065981$. Определение числа степеней свободы осуществляется из расчета оставленных

коэффициентов. В данном случае при составлении уравнения (3.5) использовалось десять коэффициентов, следовательно, $f_2 = 20$. Дисперсия неадекватности модели составляет: $SS_{\text{неад}}^2 = 0,00003299$.

Таблица 3.13 – Экспериментальные и расчетные значения отклика уравнения удельного съема материала с единицы площади

Номер опыта	q экс.	q расч.	Δy_q^2	Номер опыта	q экс	q расч.	Δy_q^2
1	0,0616667	0,06579967	0,00001708	13	0,0516667	0,05163177	0
2	0,0375	0,03744776	0	14	0,0308333	0,02827986	0,00000652
3	0,045	0,05022606	0,00002731	15	0,0258333	0,02855816	0,00000742
4	0,035	0,04322832	0,00006771	16	0,0225	0,02656042	0,00001649
5	0,0404167	0,04800338	0,00005756	17	0,0745833	0,06614653	0,00007118
6	0,0233333	0,0264223	0,00000954	18	0,0379167	0,03579688	0,00000449
7	0,0375	0,0367006	0,00000064	19	0,0570833	0,0500349	0,00004968
8	0,0379167	0,03647369	0,00000208	20	0,03625	0,03274185	0,00001231
9	0,0695833	0,07369889	0,00001694	21	0,06375	0,05392425	0,00009655
10	0,0345833	0,04357615	0,00008087	22	0,0258333	0,0251025	0,00000053
11	0,04125	0,04635445	0,00002606	23	0,0466667	0,0392704	0,00005470
12	0,0425	0,03758588	0,00002415	24	0,0404167	0,03725635	0,00000999
Σ							0,00065980

Адекватность составленной модели проходила проверку по F-критерию Фишера, который вычисляется по формуле (3.34). По результатам вычислений получаем $F_{\text{расч.}} = 0,00057239$. Табличное значение при $\alpha = 0,05$: $F_{\text{табл}, 0,05; 4; 26} = 2,742$. По результатам сравнения расчетного значения и табличного выполняется неравенство $F_{\text{расч.}} < F_{\text{табл.}}$. Следовательно, полученная математическая модель для оценки удельного съема материала q с единицы площади адекватна.

После доказательства адекватности полученной математической модели (3.39) производится ее раскодирование. Окончательная раскодированная модель имеет вид (3.40):

$$\begin{aligned}
 q = & 0,159 - 0,344B + 0,175B^2 - 6,21 \cdot 10^{-5}n_{\text{в.мао}} + 9,01 \cdot 10^{-5}Bn_{\text{в.мао}} + \\
 & 6,912 \cdot 10^{-8}n_{\text{в.мао}}^2 + 2,67 \cdot 10^{-4}s_{\text{п.мао}} - 5,87 \cdot 10^{-5}Bs_{\text{п.мао}} - 1,71 \cdot \\
 & 10^{-7}n_{\text{в.мао}}s_{\text{п.мао}} + 3,04 \cdot 10^{-7}s_{\text{п.мао}}^2 - 1,34 \cdot 10^{-2}t_{\text{мао}} + 1,8 \cdot 10^{-2}Bt_{\text{мао}} + \\
 & 4,28 \cdot 10^{-6}n_{\text{в.мао}}t_{\text{мао}} - 2,94 \cdot 10^{-5}s_{\text{п.мао}}t_{\text{мао}} + 3,85 \cdot 10^{-4}t_{\text{мао}}^2.
 \end{aligned} \tag{3.40}$$

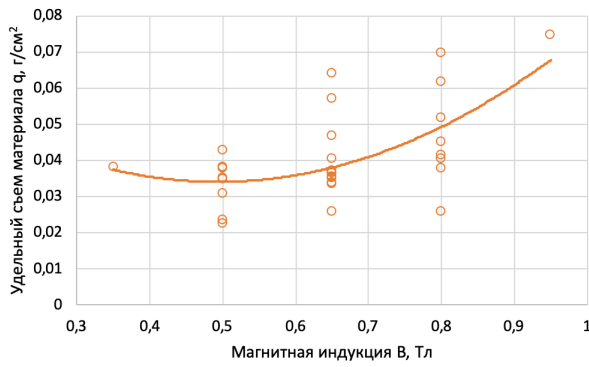
В результате экспериментальных исследований составлены полиномиальные модели, которые позволяют оценить степень влияния технологических параметров обработки: электромагнитной индукции B , времени обработки $t_{\text{мао}}$, частоты вращения $n_{\text{в.мао}}$ и продольной подачи $S_{\text{п.мао}}$ заготовки вдоль полюсных наконечников на удельный съём материала с единицы площади q . Математическое описание моделей содержит таблица 3.14, а их графическая интерпретация на рисунке 3.9.

Таблица 3.14 – Обобщающие полиномиальные модели, описывающие влияния магнитно-абразивной обработки на удельный съём материалов с единицы площади

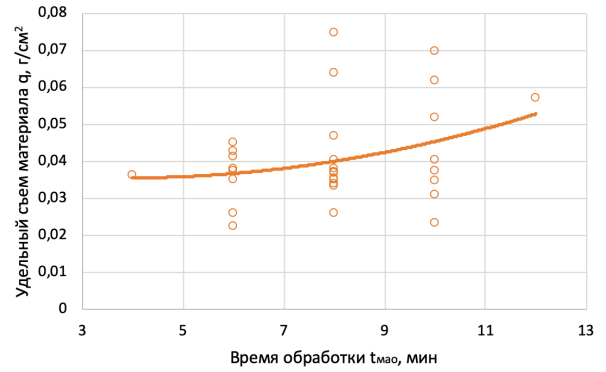
Варьируемый параметр	Обобщающая полиномиальная модель
Магнитная индукция B , Тл	$q = 0,0763 - 0,177B + 0,175B^2$
Время обработки $t_{\text{мао}}$, мин	$q = 0,0426 - 0,004t_{\text{мао}} + 3,85 \cdot 10^{-4}t_{\text{мао}}^2$
Частота вращения $n_{\text{в.мао}}$, мин ⁻¹	$q = 0,0235 + 9,296 \cdot 10^{-6}n_{\text{в.мао}} + 6,912 \cdot 10^{-8}n_{\text{в.мао}}^2$
Продольная подача $S_{\text{п.мао}}$, мм/мин	$q = 0,0387 - 6,6 \cdot 10^{-5}S_{\text{п.мао}} + 3,04 \cdot 10^{-7}S_{\text{п.мао}}^2$

Анализ математической регрессионной модели (3.40) и графиков обобщающих полиномиальных моделей свидетельствует о том, что наибольшее влияние на съём материала с поверхности керамических режущих пластин марки ВОК-60 при магнитно-абразивной обработке оказывает электромагнитная индукция B (рисунок 3.9, а).

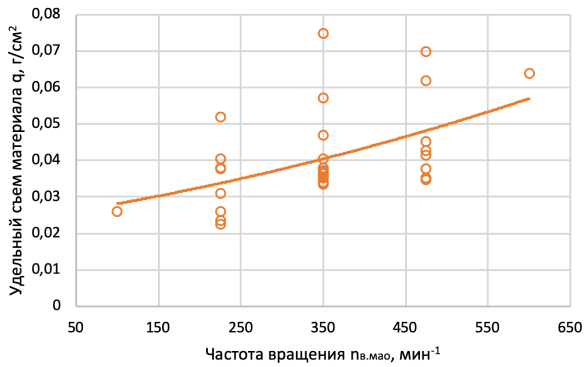
Второстепенную по значимости позицию в удельном съеме материала оказывает частота вращения $n_{\text{в.мао}}$ и затем время обработки $t_{\text{мао}}$. Параметр величины подачи $S_{\text{п.мао}}$ оказывает незначительное влияние, однако исключить данный параметр из процесса магнитно-абразивной обработки не представляется возможным.



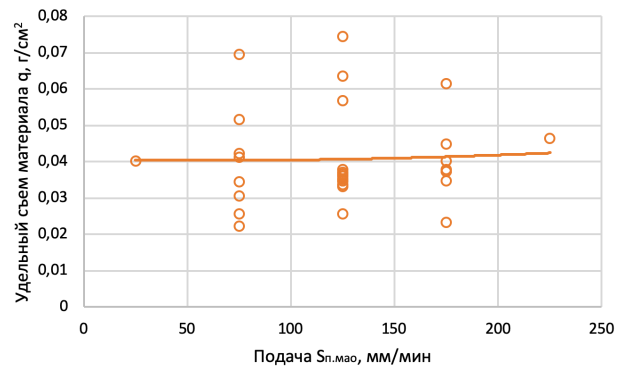
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.9 – Графики полиномиальной регрессии а) магнитной индукции, б) времени обработки, в) частоты вращения, г) продольной подачи на удельный съем материала q мг/см² при обработке керамических режущих пластин марки ВОК-60

Значение удельного съема материала с единицы площади q в исследуемом диапазоне варьируемых параметров (при $B = 0,35-0,95$ Тл; $t_{\text{мао}} = 4-12$ мин; $n_{\text{в.мао}} = 100-600$ мин⁻¹; $S_{\text{п.мао}} = 25-225$ мм/мин) варьируется в пределах от 0,0258 до 0,0745 г/см².

3.5 Влияние технологических факторов магнитно-абразивной обработки на радиус скругления режущей кромки

Анализ причин преждевременного выхода из строя керамических режущих пластин показал, что износ режущего инструмента происходит по причине выкрашивания, образования трещин на передней и задней поверхностях, а также из-за сколов режущей кромки. Возникновение признаков разрушения керамических режущих пластин связано с превышением допустимых значений

растягивающих напряжений, возникающих на передней поверхности инструмента. Одним из известных и популярных способов, способных значительно увеличить прочность режущей кромки инструмента, можно считать формирование новой геометрии режущей кромки, а именно изменение величины радиуса его скругления.

Формирование скругления режущей кромки в рекомендованном диапазоне значений приводит к изменению направления результирующей силы резания и приближает ее к биссектрисе угла заострения режущего клина. В результате чего происходит превращение растягивающих напряжений, возникающих на передней поверхности инструмента, в сжимающие. Стоит отметить, что чрезмерное увеличение радиуса скругления режущей кромки является причиной роста сил резания и увеличения температуры в зоне резания.

Распределение остаточных напряжений и их значения тесно связаны с возникающими силами резания в процессе обработки, которые во многом зависят от величины скругления режущей кромки керамических пластин.

При неправильно подобранных параметрах обработки, которые не учитывают геометрию режущего инструмента, возникает появление наростов и сколов. Это не только приводит к преждевременному износу режущего инструмента, но и к снижению качества обработанной поверхности изделия.

Магнитно-абразивный метод заточки инструмента формирует радиус скругления режущей кромки в широком диапазоне значений. Задача исследования – определить влияние варьируемых параметров магнитно-абразивной обработки на формирование радиуса скругления режущей кромки в заданном диапазоне.

Экспериментальные значения скругления радиуса скругления режущей кромки в процессе магнитно-абразивной обработки представлены в таблице 3.15.

Таблица 3.15 – Результаты исследования по определению значения радиуса скругления режущей кромки керамических режущих пластин ρ , мкм

Опыт	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	x_1^2	x_2^2	x_3^2	x_4^2	ρ
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	1	1	1	1	38,18
2	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	1	1	1	1	29,27
3	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	1	1	1	1	31,34
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	1	1	1	1	27,12
5	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	1	1	1	1	35,12
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	1	1	1	1	29,19
7	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	1	1	1	1	31,54
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	1	1	1	1	25,33
9	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	1	1	1	1	34,98
10	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	1	1	1	1	29,02
11	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	1	1	1	1	31,32
12	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	1	1	1	1	27,13
13	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	1	1	1	1	33,12
14	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	1	1	1	1	27,16
15	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	1	1	1	1	29,65
16	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	1	1	1	1	25,44
17	+1	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	36,87
18	+1	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	23,65
19	+1	0	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	33,23
20	+1	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	22,34
21	+1	0	0	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	28,78
22	+1	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	31,23
23	+1	0	0	0	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	26,32
24	+1	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	22,78
25	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22,66
26	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,98
27	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,08
28	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,77
29	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,69
30	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,45
31	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23,37

Исследования проводились согласно методике, описанной в разделе 3.2. Дальнейшие расчеты и обработка полученных результатов производилась по методике из раздела 3.3. Рассчитанные таким образом коэффициенты уравнения регрессии, дисперсия опыта, дисперсия коэффициента, среднеквадратичная ошибка и доверительный интервал представлены в таблице 3.16.

Таблица 3.16 – Результаты расчета уравнения регрессии скругления режущей кромки

Коэффициент	Значение	Среднее значение \bar{y}	Дисперсия опыта S_y^2	Дисперсия коэффициента, S_b^2	Среднеквадратичная ошибка, S_b	Доверительный интервал
b_0	25,452	25,428571 43	4,4141809 52	0,6306540327	0,79413418	1,945628733
b_1	3,001			0,18393892	0,428876156	1,050746582
b_2	2,040					
b_3	0,288					
b_4	0,681			0,27588631	0,525248807	1,286859578
b_{12}	0,496					
b_{13}	0,061					
b_{14}	0,309					
b_{23}	0,119			0,15436391	0,392928128	0,962673913
b_{24}	0,356					
b_{34}	-0,147					
b_{11}	1,570					
b_{22}	0,952					
b_{33}	1,507					
b_{44}	0,143					

В результате подстановки коэффициентов в уравнение (3.2) получаем следующее уравнение регрессии (3.41):

$$\begin{aligned}
 y_p = & 25,452 + 3,001x_1 + 2,040x_2 + 0,288x_3 + 0,681x_4 + 0,496x_1x_2 + \\
 & 0,061x_1x_3 + 0,309x_1x_4 + 0,119x_2x_3 + 0,356x_2x_4 - 0,147x_3x_4 + \\
 & 1,570x_{11} + 0,952x_{22} + 1,507x_{33} + 0,143x_{44}.
 \end{aligned} \quad (3.41)$$

Значения отклика, рассчитанные согласно уравнению (3.41), представлены в таблице 3.17. Значения из таблицы применялись для расчета дисперсии неадекватности по формуле (3.31). Расчетное значение в центре плана $y_{0 \text{ расч}} = 25,429$. Среднеквадратичная ошибка в центре плана $SS_{\text{неад } 0} = 45,06627$. Определение числа степеней свободы осуществляется из расчета оставленных коэффициентов. В данном случае при составлении уравнения (3.5) использовалось десять коэффициентов, следовательно, $f_2 = 20$. Дисперсия неадекватности модели составляет: $SS_{\text{неад}}^2 = 2,253336$.

Таблица 3.17 – Экспериментальные и расчетные значения отклика уравнения радиуса скругления режущей кромки

Номер опыта	$\rho_{\text{экс.}}$	$\rho_{\text{расч.}}$	Δy_{ρ}^2	Номер опыта	$\rho_{\text{экс.}}$	$\rho_{\text{расч.}}$	Δy_{ρ}^2
1	38,18	36,8282589	1,82720400	13	33,12	33,1997705	0,00636333
2	29,27	29,0940287	0,03096590	14	27,16	26,9455403	0,04599296
3	31,34	30,8075159	0,28353932	15	29,65	29,0790275	0,32600960
4	27,12	25,0557857	4,26098068	16	25,44	24,8072973	0,40031271
5	35,12	36,1861295	1,13663211	17	36,87	37,7370083	0,75170339
6	29,19	28,6943993	0,24562005	18	23,65	25,7310479	4,33076036
7	31,54	30,6428865	0,80481263	19	33,23	33,3385211	0,01177683
8	25,33	25,1336563	0,03855085	20	22,34	25,1795351	8,06295958
9	34,98	34,4293999	0,30316047	21	28,78	32,0549075	10,72501913
10	29,02	27,9326697	1,18228718	22	31,23	30,9031487	0,10683177
11	31,32	29,8311569	2,21665378	23	26,32	27,3866371	1,13771470
12	27,13	25,3169267	3,28723479	24	22,78	24,6614191	3,53973783
Σ						45,06282396	

Адекватность составленной модели проходит проверку по F-критерию Фишера, который вычисляется по формуле (3.34). По результатам вычислений получаем $F_{\text{расч.}} = 1,1502753$. Табличное значение при $\alpha = 0,05$: $F_{\text{табл}, 0,05; 4; 26} = 2,742$. По результатам сравнения расчетного значения и табличного выполняется неравенство $F_{\text{расч.}} < F_{\text{табл.}}$. Значит полученная математическая модель для оценки величины скругления режущей кромки ρ адекватна.

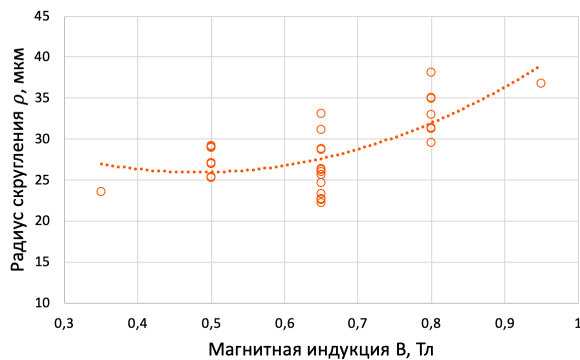
После доказательства адекватности полученной математической модели (3.41) производится ее раскодирование. Окончательная раскодированная модель имеет вид (3.42):

$$\begin{aligned} \rho = & 75,749 - 90,219B + 69,778B^2 - 0,068n_{\text{в.мао}} + 0,325 \cdot 10^{-2}Bn_{\text{в.мао}} + \\ & 0,964 \cdot 10^{-4}n_{\text{в.мао}}^2 - 0,0477S_{\text{п.мао}} + 0,0412BS_{\text{п.мао}} - 0,235 \cdot \\ & 10^{-4}n_{\text{в.мао}}S_{\text{п.мао}} + 0,572 \cdot 10^{-4}S_{\text{п.мао}}^2 - 4,474t_{\text{мао}} + 1,653Bt_{\text{мао}} + 0,476 \cdot \\ & 10^{-3}n_{\text{в.мао}}t_{\text{мао}} + 0,00356S_{\text{п.мао}}t_{\text{мао}} + 0,238t_{\text{мао}}^2. \end{aligned} \quad (3.42)$$

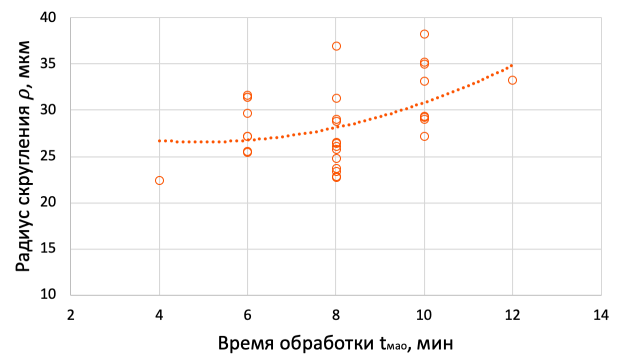
Математическое описание моделей приведено в таблице 3.18, а их графическая интерпретация на рисунке 3.10

Таблица 3.18 – Обобщающие полиномиальные модели, описывающие влияния магнитно-абразивной обработки на радиус скругления режущей кромки

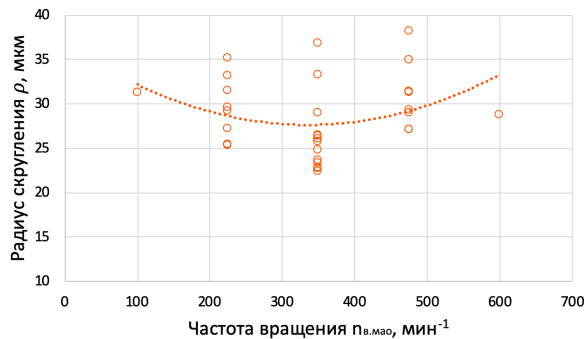
Варьируемый параметр	Обобщающая полиномиальная модель
Магнитная индукция B , Тл	$\rho = 41,929 - 70,705B + 69,78B^2$
Время обработки $t_{\text{мао}}$, мин	$\rho = 32,524 - 2,788t_{\text{мао}} + 0,238t_{\text{мао}}^2$
Частота вращения $n_{\text{в.мао}}$, мин ⁻¹	$\rho = 36,46 - 0,0652n_{\text{в.мао}} + 9,65 \cdot 10^{-5}n_{\text{в.мао}}^2$
Продольная подача $S_{\text{п.мао}}$, мм/мин	$\rho = 24,643 - 6,8 \cdot 10^{-4}S_{\text{п.мао}} + 5,72 \cdot 10^{-5}S_{\text{п.мао}}^2$



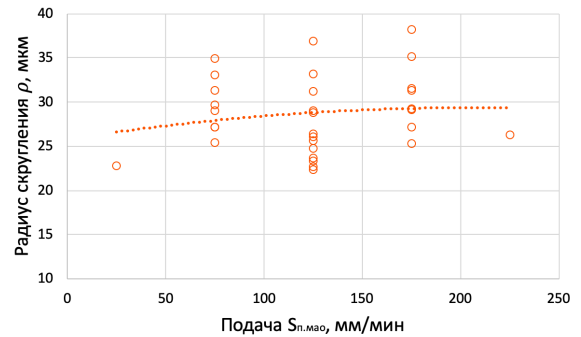
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.10 – Графики полиномиальной регрессии а) магнитной индукции, б) времени обработки, в) частоты вращения, г) продольной подачи на величину скругления режущей кромки ρ , мкм при обработке керамических режущих пластин марки ВОК-60

Исследование влияния МАО показало, что микропрофиль керамических режущих пластин способен меняться под воздействием МАИ. Это наглядно демонстрируется на радиусе скругления режущей кромки, который увеличивается с 5 до 40 мкм.

Анализ обобщающей полиномиальной функции влияния на радиус скругления режущей кромки керамических пластин марки ВОК-60 от величины электромагнитной индукции B (рисунок 3.10, а) показал, что изменение величины индукции в диапазоне 0,35 до 0,95 Тл сопровождается увеличением величины скругления режущей кромки до 40 мкм. Повышение электромагнитной индукции приводит к снижению эластичности магнитно-абразивной щетки и возрастанию силы резания. Возникающие силы в процессе микрорезания воздействуют на заготовку, удаляя приповерхностный слой материала. Увеличение съема материала способствует интенсивности процесса формирования скругления режущей кромки.

Обобщающая полиномиальная функция (рисунок 3.10, б) влияния времени обработки $t_{\text{мао}}$ на радиус скругления режущей кромки ρ показывает, что изменение времени обработки от 4 до 12 минут приводит к увеличению радиуса скругления от 27 мкм до 35 мкм. Продолжительность обработки сопровождается увеличением циклов микрорезания каждым отдельно взятым зерном. В процессе МАО ферроабразивные зерна постоянно перемешиваются в рабочем пространстве, меняя свое положение относительно заготовки, что способствует сохранению их режущей способности. Стабильный механизм съема материала является одним из главных факторов линейного увеличения значения скругления режущей кромки с течением времени. Магнитно-абразивная обработка с временем $t_{\text{мао}} > 12$ мин не изучена в данном исследовании. Однако, согласно прослеживаемой тенденции распределения средних значений величины скругления режущей кромки, предположено, что данная характеристика продолжит увеличиваться, но значения и пределы не известны.

Обобщающая полиномиальная функция (рисунок 3.10, в) влияния частоты вращения $n_{\text{в.мао}}$ на радиус скругления режущей кромки ρ показывает, что изменение частоты вращения от 100 до 600 мин⁻¹ способно изменять величину радиуса скругления от 27 до 34 мкм. При этом максимальные значения радиуса скругления достигаются при граничных значениях интенсивности вращения. Интервал от 250 до 450 мин⁻¹ характеризуется наименьшим получаемым радиусом скругления режущей кромки. Одной из возможных причин может являться залипание абразивных зерен на поверхности заготовки. Данный процесс

наблюдается, когда ферромагнитная масса скапливается у поверхности обрабатываемой детали и не успевает обновлять свою режущую способность за счет перемешивания абразивных зерен. В таком случае режущая кромка абразивных зерен притупляется и негативно влияет на съем материала и, как следствие, приводит к снижению интенсивности скругления режущей кромки.

Обобщающая полиномиальная функция (рисунок 3.10, г) влияния величины подачи $S_{п.мао}$ на радиус скругления режущей кромки ρ показывает, что данный варьируемый параметр имеет наименьшее влияние на формирование режущей кромки инструмента. При увеличении подачи от 25 до 225 мм/мин, радиус скругления изменяется в узком диапазоне от 26 до 29 мкм.

С целью анализа комбинированных зависимостей варьируемых параметров магнитно-абразивной обработки в процессе формирования величины скругления режущей кромки построены 3D пространства (рисунок 3.11).

Представленные зависимости показывают, что характеристики изменения величины радиуса скругления режущей кромки керамических режущих пластин марки ВОК-60 носят экспоненциальный характер.

Интенсивность изменения радиуса скругления кромки зависит от изменяемых варьируемых параметров магнитно-абразивной обработки. Наибольшая зависимость наблюдается при комплексном изменении величины электромагнитного поля и времени обработки, что способствует формированию радиуса скругления до 40 мкм. Наименьшее влияние оказывает сочетание величины подачи и скорости вращения при которых радиус скругления находится в пределах от 20 до 30 мкм.

В результате проведенного графического анализа комбинированных зависимостей варьируемых параметров магнитно-абразивной обработки на величину скругления режущей кромки выявлено, что наибольшее влияние на процесс формирования скругления режущей кромки оказывают электромагнитная индукция и время обработки.

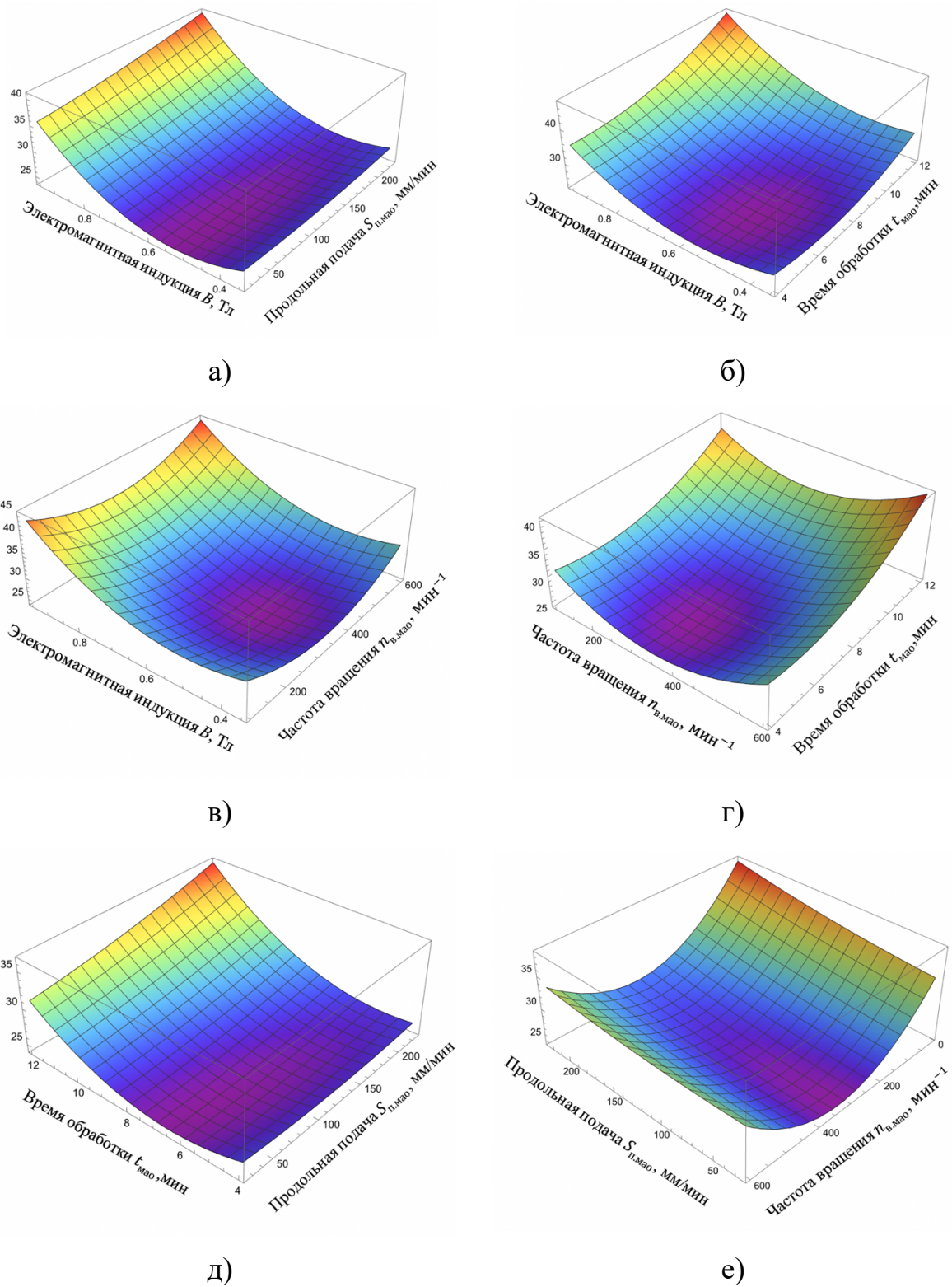


Рисунок 3.11 – Графики комбинированного влияния MAO на формирование величины скругления режущей кромки ρ : а) электромагнитной индукции и величины продольной подачи, б) электромагнитной индукции и времени обработки, в) частоты вращения и электромагнитной индукции, г) частоты вращения и времени обработки, д) времени обработки и величины продольной подачи, е) частоты вращения и величины продольной подачи

3.6 Влияние магнитно-абразивной обработки на качество поверхности керамических режущих пластин

Магнитно-абразивная обработка поверхностного слоя керамических режущих пластин может привести к возникновению и вскрытию внутренних дефектов, которые неблагоприятно сказываются на качестве поверхностного слоя.

Для формирования комплексной оценки влияния исследуемых варьируемых параметров магнитно-абразивной обработки на качество обработки проводилось изучение поверхности керамических пластин до и после обработки. Также был изучен вопрос значимости каждого из варьируемых параметров в исследуемом диапазоне значений.

Для проведения вышеописанного исследования был выбран ряд образцов, обработанных при соблюдении следующих параметров магнитно-абразивной обработки:

1. $t_{\text{мао}} = 6$ мин, $n_{\text{в.мао}} = 475$ мин⁻¹, $S_{\text{п.мао}} = 175$ мм/мин, $B = 0,8$ Тл, формируемая шероховатость поверхности $R_a = 0,21$ мкм, удельный съём материала $q = 0,035$ г/см²;

2. $t_{\text{мао}} = 10$ мин, $n_{\text{в.мао}} = 475$ мин⁻¹, $S_{\text{п.мао}} = 175$ мм/мин, $B = 0,5$ Тл, формируемая шероховатость поверхности $R_a = 0,11$ мкм, удельный съём материала $q = 0,062$ г/см²;

3. $t_{\text{мао}} = 8$ мин, $n_{\text{в.мао}} = 600$ мин⁻¹, $S_{\text{п.мао}} = 125$ мм/мин, $B = 0,65$ Тл, формируемая шероховатость поверхности $R_a = 0,13$ мкм, удельный съём материала $q = 0,063$ г/см²;

4. $t_{\text{мао}} = 8$ мин, $n_{\text{в.мао}} = 350$ мин⁻¹, $S_{\text{п.мао}} = 225$ мм/мин, $B = 0,65$ Тл, формируемая шероховатость поверхности $R_a = 0,21$ мкм, удельный съём материала $q = 0,047$ г/см²;

5. $t_{\text{мао}} = 8$ мин, $n_{\text{в.мао}} = 350$ мин⁻¹, $S_{\text{п.мао}} = 125$ мм/мин, $B = 0,65$ Тл, формируемая шероховатость поверхности $R_a = 0,22$ мкм, удельный съём материала $q = 0,035$ г/см².

Визуальный контроль поверхности керамических режущих пластин при различных технологических параметрах магнитно-абразивной обработки

продемонстрировал изменение структуры поверхностного слоя, нивелирование следов и дефектов предыдущей обработки, а также изменение геометрии режущих кромок инструмента.

Интенсивность получаемых изменений и формирование новой микрогеометрии режущей кромки зависит от сочетания варьируемых параметров их обработки, но стоит отметить, что положительный эффект достигается даже при ведении процесса магнитно-абразивной обработки с неоптимальными значениями технологических параметров.

Анализ рисунков 3.12-3.16 позволяет оценить степень изменения поверхностного слоя керамических режущих пластин и сделать вывод о том, что наибольшие изменения поверхностного слоя и геометрии инструмента наблюдаются при высоких значениях времени обработки $t_{мао}$ и величины электромагнитной индукции B , а наименьшие при варьировании значения продольной подачи $S_{п.мао}$. Это подтверждает установленные математические зависимости варьируемых параметров магнитно-абразивной обработки на формирование скругления режущей кромки, снижение шероховатости поверхностей и удельный съем материала с единицы площади, представленные в пунктах 3,3, 3,4 и 3,5 настоящей диссертации.

Визуальное исследование поверхностного слоя обработанной заготовки важная часть при определении правильности выбора значений варьируемых параметров. Установление различного рода дефектов на поверхности может свидетельствовать о неправильно подобранных параметрах обработки, что в свою очередь в дальнейшем сказывается на износостойкости изделия и его эксплуатационных свойствах.

Контроль качества обработки керамических пластин проводился по передней поверхности, фаске режущей кромки, режущей кромке, вершине режущей кромки и задней поверхности. Оценка качества определялась по совокупности анализа каждой из указанных поверхностей режущего инструмента.

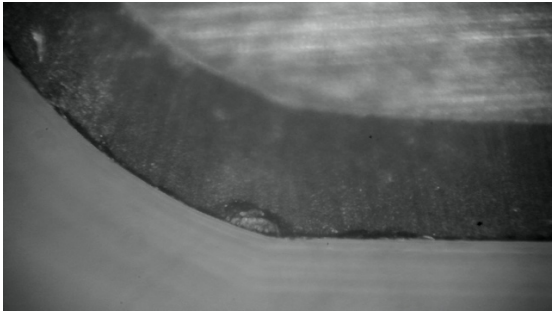
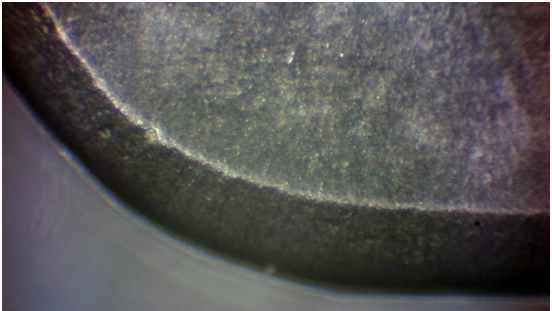
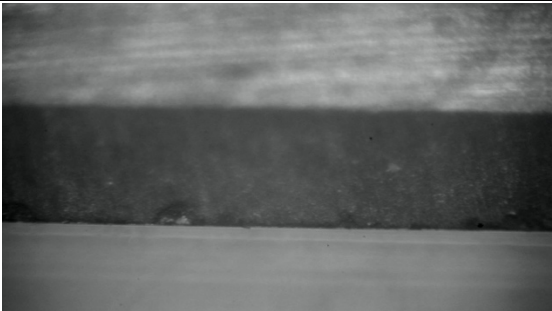

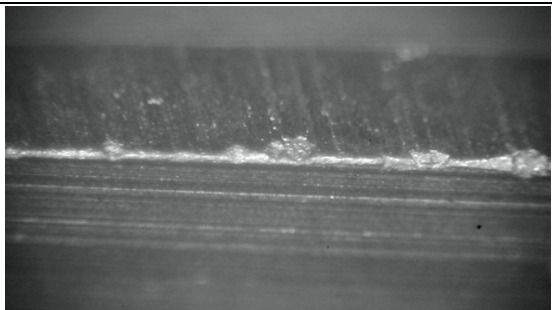
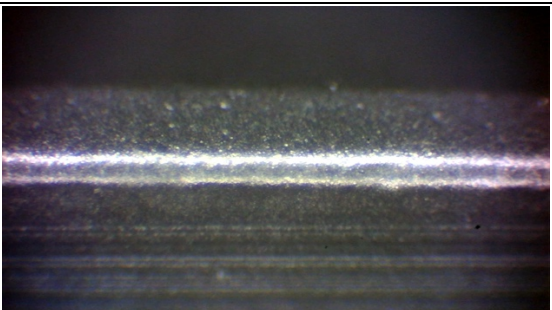
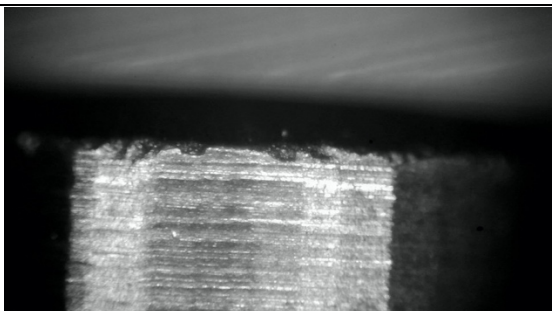
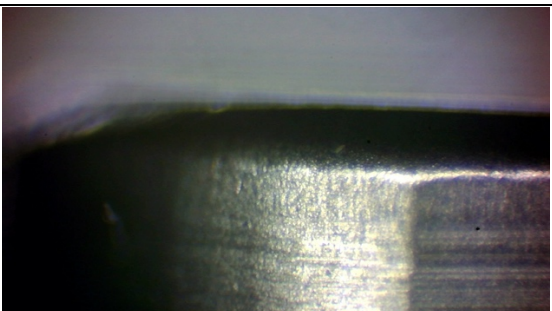
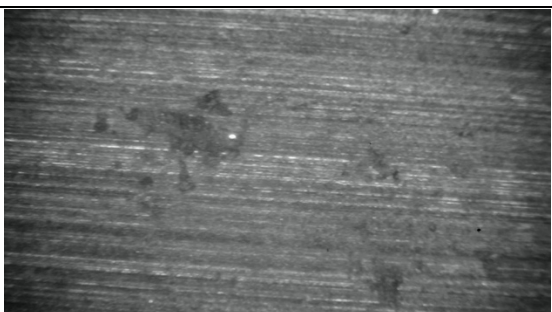

	Керамическая пластина марки ВОК-60 до МАО	Керамическая пластина марки ВОК-60 после МАО
Передняя поверхность		
Фаска на режущей кромке		
Режущая кромка		
Вершина режущей кромки		
Задняя поверхность		

Рисунок 3.12 – Поверхность керамических режущих пластин марки ВОК-60 до и после магнитно-абразивной обработки с технологическими параметрами: $t_{\text{мао}} = 6$

мин, $n_{\text{в.мао}} = 475 \text{ мин}^{-1}$, $S_{\text{п.мао}} = 175 \text{ мм/мин}$, $B = 0,8 \text{ Тл}$

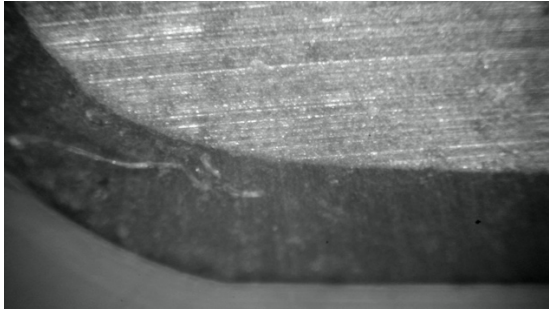
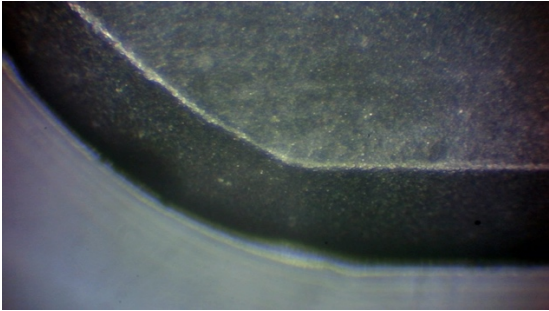

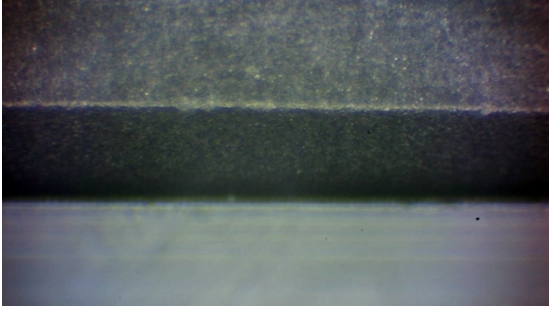
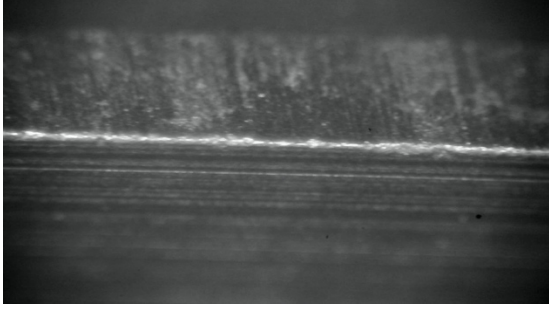
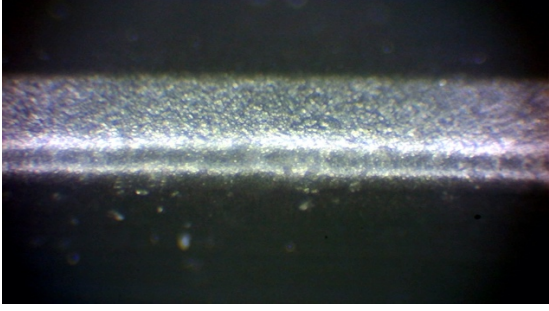
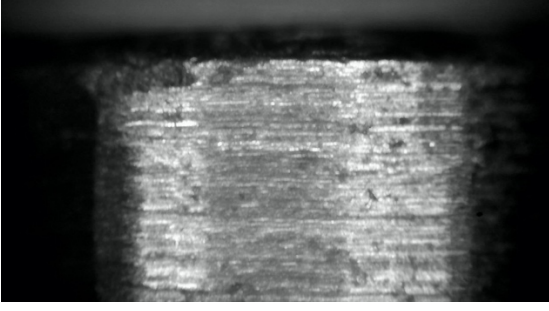
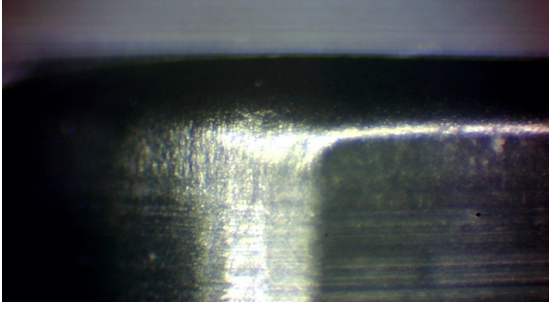
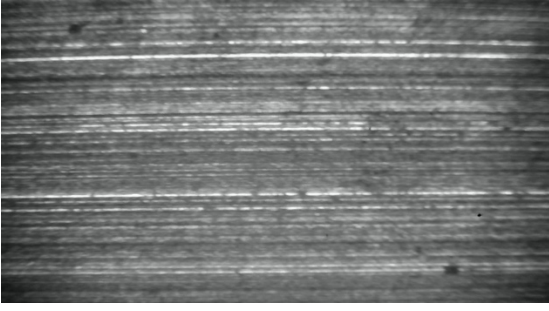

	Керамическая пластина марки ВОК-60 до МАО	Керамическая пластина марки ВОК-60 после МАО
Передняя поверхность		
Фаска на режущей кромке		
Режущая кромка		
Вершина режущей кромки		
Задняя поверхность		

Рисунок 3.13 – Поверхность керамических режущих пластин марки ВОК-60 до и после магнитно-абразивной обработки с технологическими параметрами: $t_{\text{мао}} = 10$

$$\text{мин, } n_{\text{в.мао}} = 475 \text{ мин}^{-1}, S_{\text{п.мао}} = 175 \text{ мм/мин, } B = 0,5 \text{ Тл}$$

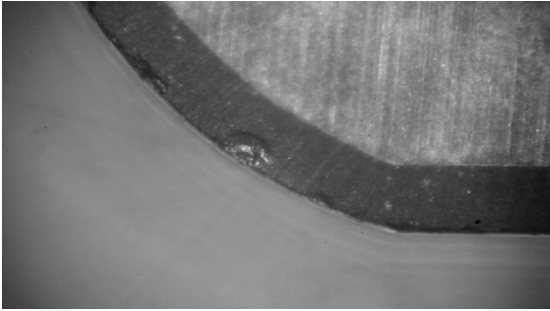
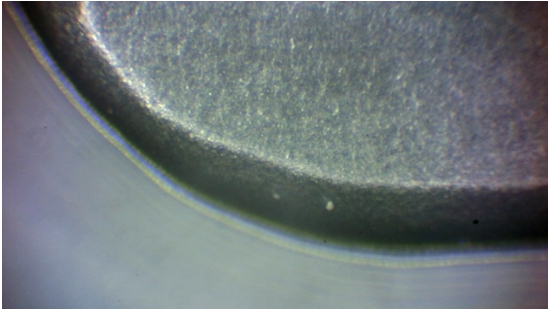

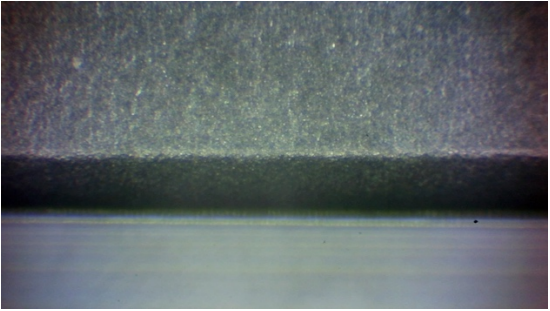
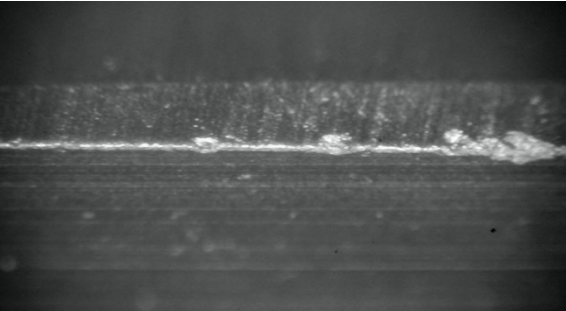
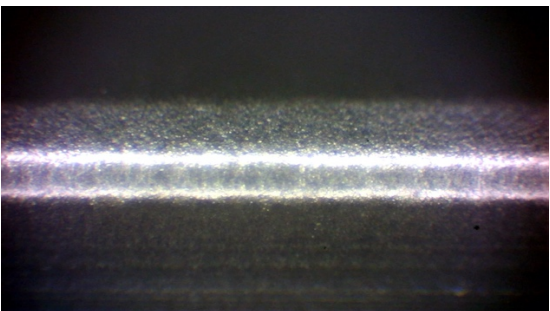
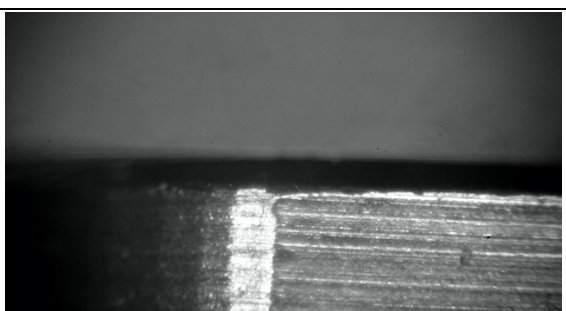
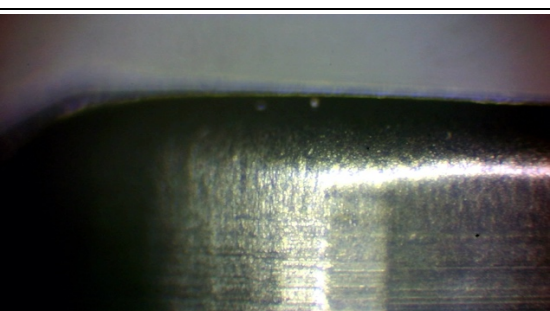
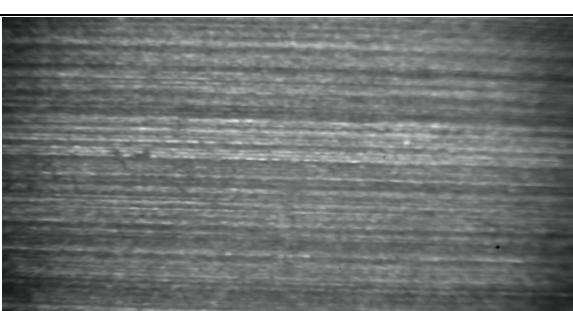
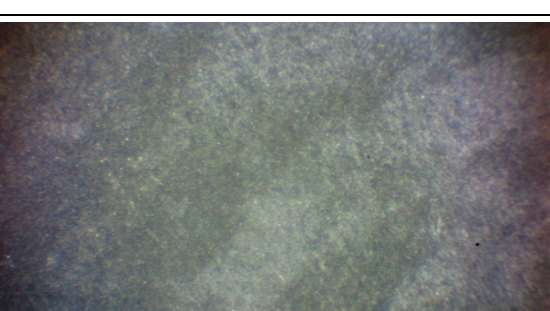
	Керамическая пластина марки ВОК-60 до MAO	Керамическая пластина марки ВОК-60 после MAO
Передняя поверхность		
Фаска на режущей кромке		
Режущая кромка		
Вершина режущей кромки		
Задняя поверхность		

Рисунок 3.14 – Поверхность керамических режущих пластин марки ВОК-60 до и после магнитно-абразивной обработки с технологическими параметрами: $t_{\text{MAO}} = 8$ мин, $n_{\text{В.мао}} = 600 \text{ мин}^{-1}$, $S_{\text{п.мао}} = 125 \text{ мм/мин}$, $B = 0,65 \text{ Тл}$

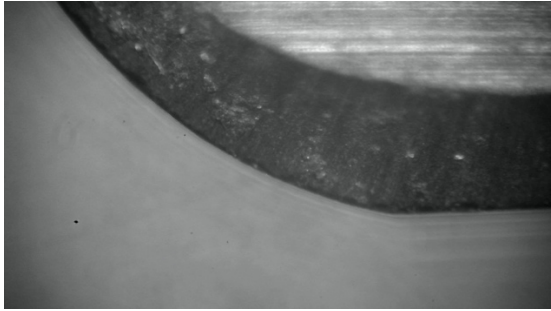
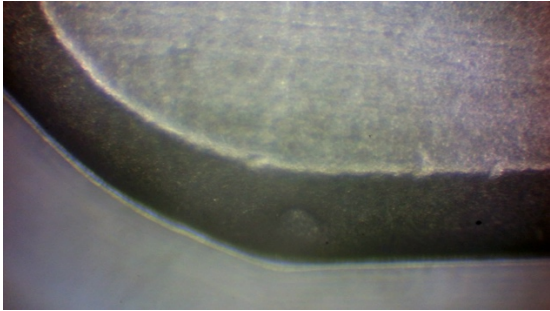


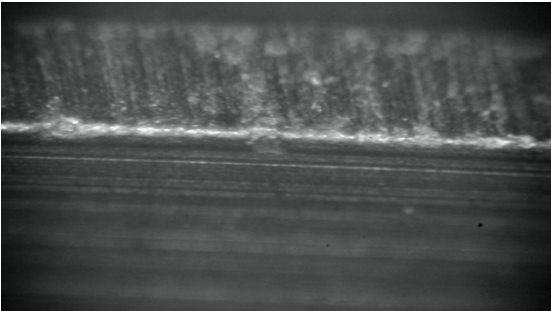
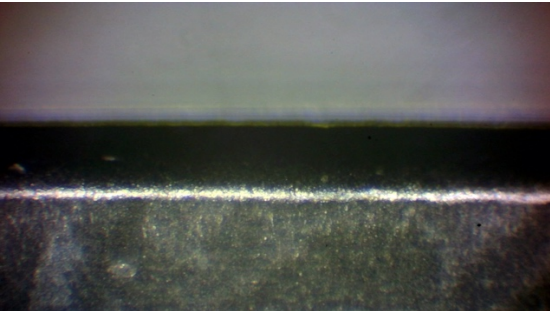
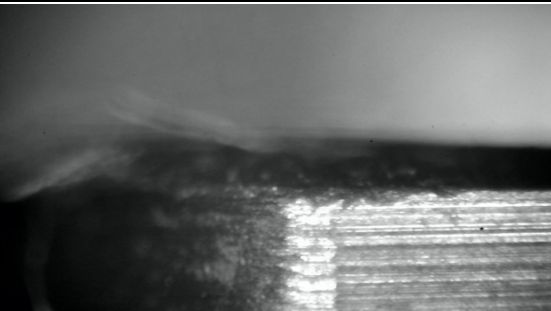
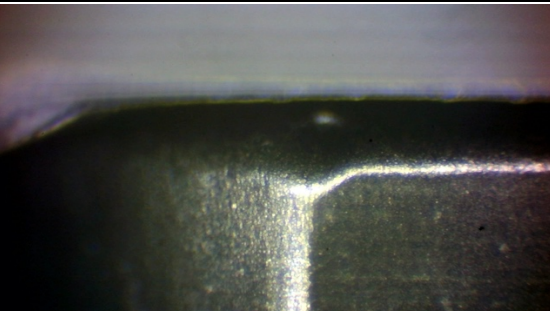
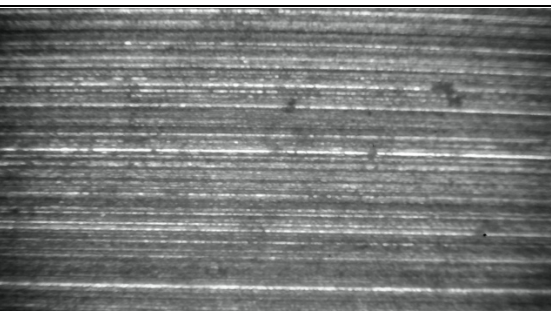

	Керамическая пластина марки ВОК-60 до MAO	Керамическая пластина марки ВОК-60 после MAO
Передняя поверхность		
Фаска на режущей кромке		
Режущая кромка		
Вершина режущей кромки		
Задняя поверхность		

Рисунок 3.15 – Поверхность керамических режущих пластин марки ВОК-60 до и после магнитно-абразивной обработки с технологическими параметрами: $t_{\text{MAO}} = 8$

мин, $n_{\text{в.мао}} = 350 \text{ мин}^{-1}$, $S_{\text{п.мао}} = 225 \text{ мм/мин}$, $B = 0,65 \text{ Тл}$

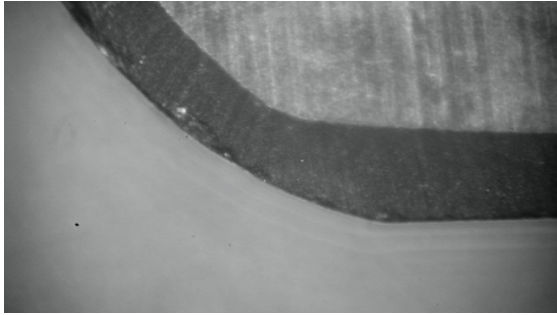
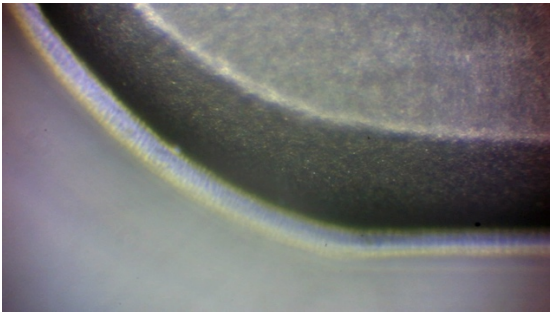
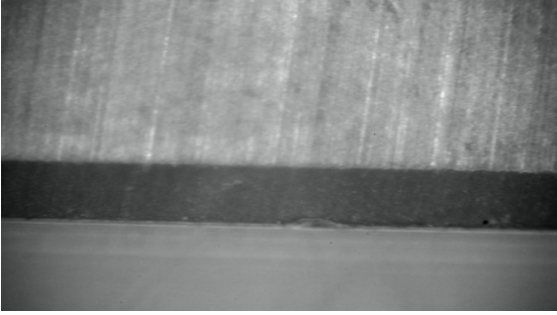
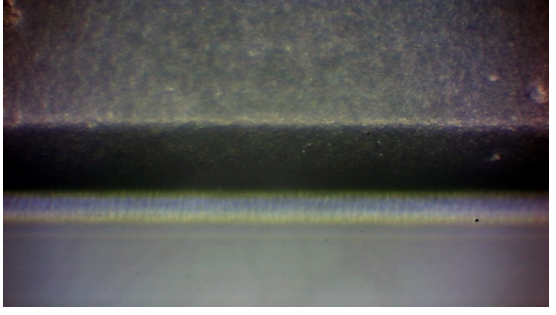
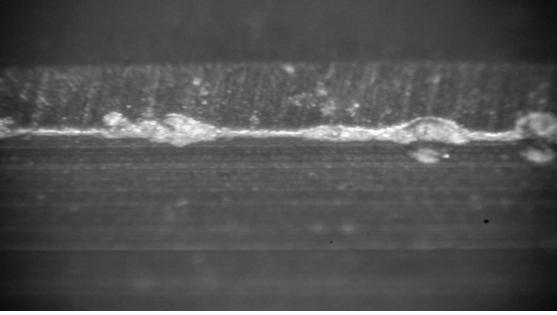
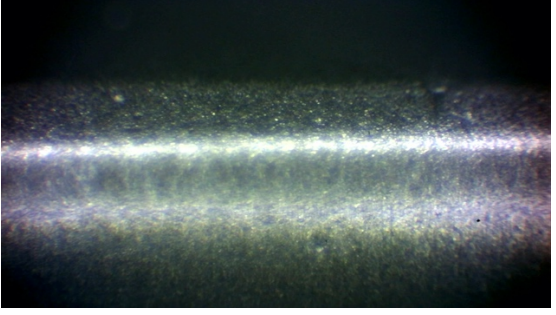
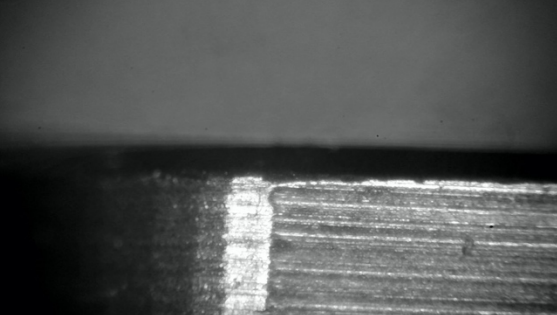
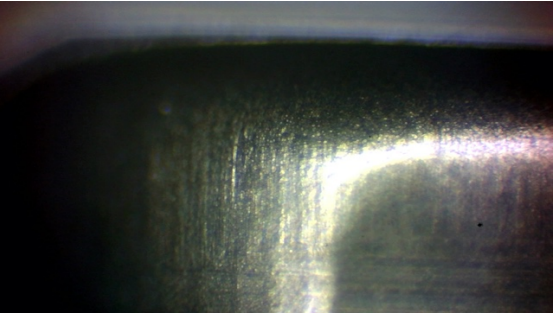
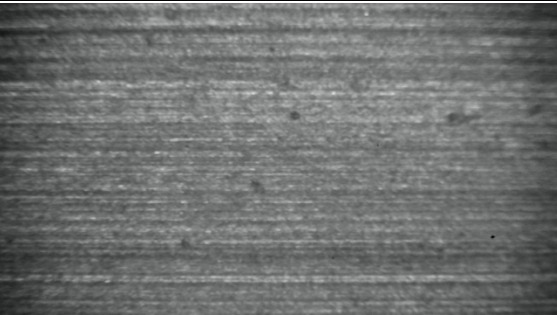

	Керамическая пластина марки ВОК-60 до МАО	Керамическая пластина марки ВОК-60 после МАО
Передняя поверхность		
Фаска на режущей кромке		
Режущая кромка		
Вершина режущей кромки		
Задняя поверхность		

Рисунок 3.16 – Поверхность керамических режущих пластин марки ВОК-60 до и после магнитно-абразивной обработки с технологическими параметрами: $t_{\text{мао}} = 8$

мин, $n_{\text{в.мао}} = 350 \text{ мин}^{-1}$, $S_{\text{п.мао}} = 125 \text{ мм/мин}$, $B = 0,65 \text{ Тл}$.

3.7. Выводы по третьей главе

1. Получены регрессионные математические зависимости, которые с высокой точностью прогнозируют шероховатость поверхности, величину скругления режущей кромки и производительность процесса по удельному съему материала с единицы поверхности при магнитно-абразивной обработке керамических режущих пластин марки ВОК-60 от технологических варьируемых параметров процесса: электромагнитной индукции B , Тл, времени обработки $t_{\text{мао}}$, мин, частоты вращения $n_{\text{в.мао}}$, мин⁻¹, величины продольной подачи $S_{\text{п.мао}}$, мм/мин.

2. Получены полиномиальные модели, которые позволяют отдельно оценить влияние исследуемых варьируемых параметров магнитно-абразивной обработки на получаемую шероховатость поверхности, радиус скругления режущей кромки и удельный съем материала с единицы площади.

3. Экспериментально установлено, что на шероховатость обрабатываемой поверхности наибольшее влияние оказывает частота вращения $n_{\text{в.мао}}$, второстепенную позицию занимает подача $S_{\text{п.мао}}$ и затем электромагнитная индукция B ; на скругление режущей кромки и удельный съем материала наибольшее влияние оказывает электромагнитная индукция B и время обработки $t_{\text{мао}}$, второстепенную позицию занимает частота вращения $n_{\text{в.мао}}$.

4. Экспериментально установлено, что процесс магнитно-абразивной обработки помогает нивелировать дефекты предшествующих операций и сформировать новую микроструктуру приповерхностного слоя режущего инструмента с шероховатостью $R_a = 0,1$ мкм.

5. Экспериментально установлено, что процесс магнитно-абразивной обработки способен скруглить режущую кромку керамических режущих пластин до 40 мкм в исследуемом диапазоне варьируемых параметров.

6. Определена производительность магнитно-абразивной обработки, выражаемая в удельном съеме материала с единицы площади, который варьируется в пределах от 0,0258 до 0,0745 г/см².

7. По результатам оптического контроля установлено, что процесс магнитно-абразивной обработки в процессе микрорезания формирует приповерхностный слой изделия с новыми физико-химическими свойствами.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРНОСТЕЙ

Режущая кромка может быть определена линией перехода между передней и задней поверхностями. Эту линию можно условно представить в виде цилиндрической поверхности определенного радиуса [52]. Данный радиус принято называть радиусом скругления режущей кромки и обозначать ρ .

Форма и величина радиуса скругления ρ , а также качество поверхности вдоль всей линии режущей кромки оказывают значительное влияние на возникающую в процессе обработки силу резания, предопределяет процесс стружкообразования и влияет на другие составляющие процесса резания.

Установившееся стружкообразование наблюдается при любом соотношении a/ρ . Важно отметить, что при малых a/ρ усадка стремится к ∞ , в следствие чего скорость стружки становится настолько малой, что получаемая форма стружки не имеет ничего общего с привычным ее представлением. Вид стружки, привычный для процесса резания, может наблюдаться только при определенном значении толщины среза, который обеспечивает стружкообразование. Минимальное значение толщины среза, характеризующее эффективность процесса резания, должно находиться в пределах $a = (0,2 \div 0,4)\rho$ [10].

Работа Sathyan Subbiah [90] показала, что возрастание значения величины скругления режущей кромки приводит к увеличению температуры в зоне резания, возрастанию пластических деформаций и силы резания. В своей работе J. Rech [95] доказал, что формируемый радиус скругления режущей кромки имеет прямое значение на изменение ресурса инструмента. В некоторых случаях это может приводить к уменьшению износостойкости поверхности инструмента и, соответственно, к снижению его ресурса.

В работе [103] доказано, что увеличенный радиус скругления режущей кромки способен повышать прочность самого инструмента. В тоже время формирование величины скругления режущей кромки выше определенных значений приводит к возрастанию сил резания. Традиционный процесс резания

плавно перетекает в процесс вдавливания инструмента в поверхность обрабатываемого изделия.

Инструменты с закругленными режущими кромками имеют большую площадь контакта между срезаемым слоем и обрабатываемой поверхностью, что увеличивает усилия как на передней, так и на задней поверхностях.

В настоящем разделе диссертации представлены результаты исследования обработки стали 40X2H2МА керамическими пластинами с измененной микрогеометрией режущей кромки и уменьшенной шероховатостью передней и задней поверхностей в результате магнитно-абразивной обработки.

4.1 Методика проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования влияния подготовленного керамического режущего инструмента марки ВОК-60 методом магнитно-абразивной обработки проводились в промышленных условиях на предприятии АО ВО «Электроаппарат». Основной целью проводимых испытаний являлось изучение влияния геометрических параметров инструмента на обеспечение технологического качества изделий из хладостойкой стали 40X2H2МА с достижением шероховатости $R_a = 0,8$ мкм.

Испытания по влиянию шероховатости рабочих поверхностей и радиуса скругления керамических режущих пластин проводили на токарном станке 16К20. Обрабатываемой заготовкой являлся цилиндр диаметром 40 мм и длиной 250 мм. Материал заготовки – сталь 40X2H2МА (НВ 235-277) (рисунок 4.1, а).

Заготовка устанавливалась в трехкулачковом патроне и поджималась задним центром. Режим резания: скорость резания $V = 350$ м/мин, подача $S = 0,1$ мм/об, глубина $t = 0,05$ мм, что соответствует режимным параметрам, характерным для чистового точения детали.

Режущие керамические пластины марки ВОК-60 механически закреплялись в державке CSDNN2525M12 сечением 25x25 с углом в плане 45° (рисунок 4.1, б).



а)



б)

Рисунок 4.1 – Чистовое точение стали 40X2H2МА, где: а) установка заготовки на токарном станке 16К20, б) механическое закрепление керамической пластины ВОК-60 в державке

Для проведения исследований были отобраны образцы керамических режущих пластин ВОК-60 и разделены на серии. Всего использовали 6 серий образцов. В первой серии испытаний были использованы керамические режущие пластины без предварительной подготовки, во второй серии испытаны образцы подготовленные посредством магнитно-абразивной обработки с режимными параметрами $B = 0,8$ Тл, $t_{\text{мао}} = 10$ мин, $n_{\text{в.мао}} = 475$ мин⁻¹, $S_{\text{п.мао}} = 175$ мм/мин (радиус скругления пластины $\rho = 38,18$ мкм, шероховатость $R_a = 0,155$ мкм), в третьей серии испытаны образцы подготовленные посредством магнитно-абразивной обработки с режимными параметрами $B = 0,8$ Тл, $t_{\text{мао}} = 10$ мин, $n_{\text{в.мао}} = 255$ мин⁻¹, $S_{\text{п.мао}} = 175$ мм/мин (радиус скругления пластины $\rho = 35,12$ мкм, шероховатость $R_a = 0,133$ мкм), в четвертой серии испытаны образцы подготовленные посредством магнитно-абразивной обработки с режимными параметрами $B = 0,8$ Тл, $t_{\text{мао}} = 6$ мин, $n_{\text{в.мао}} = 475$ мин⁻¹, $S_{\text{п.мао}} = 75$ мм/мин (радиус скругления пластины $\rho = 31,32$ мкм, шероховатость $R_a = 0,103$ мкм), в пятой серии испытаны образцы подготовленные посредством магнитно-абразивной обработки с режимными параметрами $B = 0,5$ Тл, $t_{\text{мао}} = 10$ мин, $n_{\text{в.мао}} = 255$ мин⁻¹, $S_{\text{п.мао}} = 75$ мм/мин (радиус скругления пластины $\rho = 27,16$ мкм, шероховатость $R_a = 0,279$ мкм), в шестой серии испытаны образцы подготовленные посредством магнитно-

абразивной обработки с режимными параметрами $B = 0,65$ Тл, $t_{\text{мао}} = 4$ мин, $n_{\text{в.мао}} = 350$ мин⁻¹, $S_{\text{п.мао}} = 125$ мм/мин (радиус скругления пластины $\rho = 22,34$ мкм, шероховатость $R_a = 0,188$ мкм).

Оценку качества прецизионной поверхности изделий из хладостойкой стали 40Х2Н2МА, обработанной в каждой из шести серий, проводили по значению шероховатости R_a с использованием профилометра *Mitutoyo Surftest SJ-210* на базовой длине равной 25 мм (рисунок 4.2).

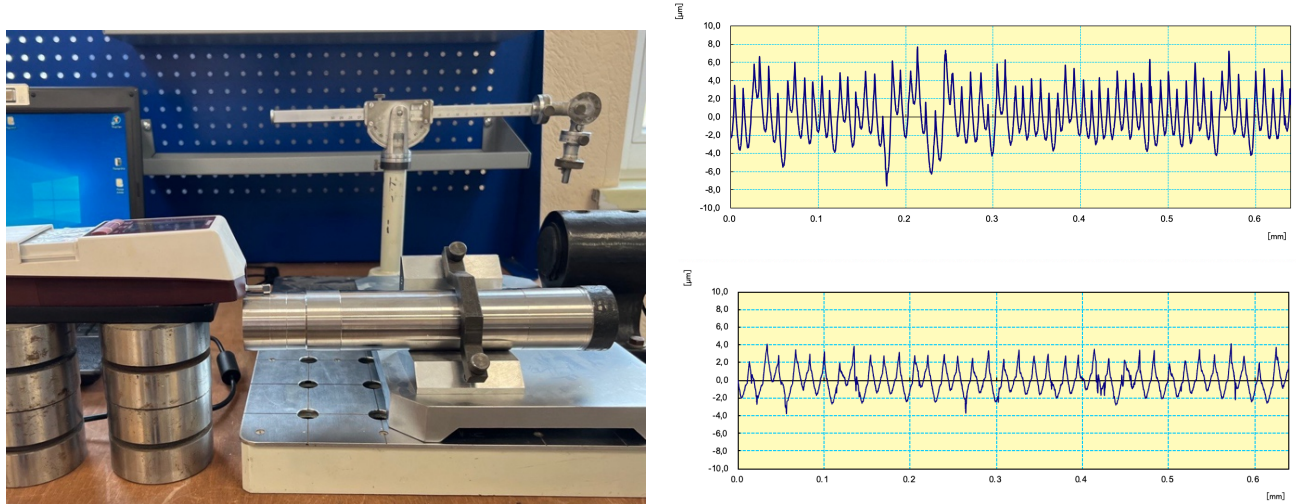


Рисунок 4.2 – Измерение шероховатости R_a обработанного изделия из стали 40Х2Н2МА

Для оценки топографии и дефектности обработанной поверхности изделия из закаленной стали 40Х2Н2МА использовался микроскоп *MarVision MM 320*.

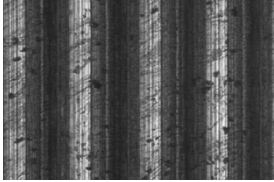
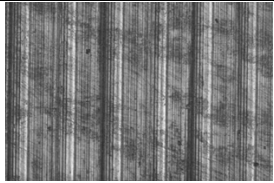
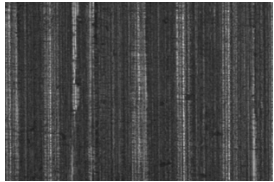
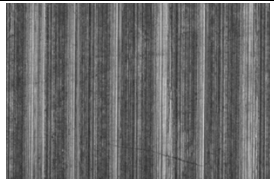
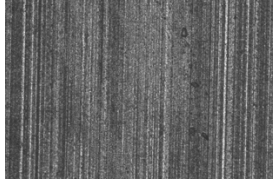
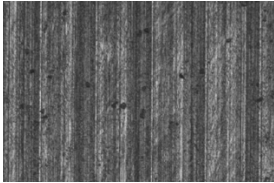
4.2 Оценка качества обработанной поверхности изделия из хладостойкой стали 40Х2Н2МА

Анализ микроструктуры поверхностного слоя обработанной поверхности стали 40Х2Н2МА в процессе чистового точения керамическими пластинами ВОК-60 позволяет оценить влияние предварительной подготовки инструмента методом магнитно-абразивной обработки.

Для оценки качества полученной стали применялись визуальные метод оценки топографии поверхности и измерения шероховатости R_a (Таблица 4.1). С целью обеспечения корректности полученных результатов в каждой серии

исследований использовалось по три образца керамических пластин, имеющих равные геометрические характеристики.

Таблица 4.1 – Результаты оценки качества обработанной поверхности стали 40Х2Н2МА керамическими режущими пластинами ВОК-60

Серия	Образец	Топография поверхности	Шероховатость стали R_a , мкм
1	1		1,86
	2		1,91
	3		1,72
2	4		1,55
	5		1,34
	6		1,46
3	7		1,22
	8		1,33
	9		1,1
4	10		0,92
	11		0,96
	12		0,94
5	13		0,81
	14		0,85
	15		0,8
6	16		1,17
	17		0,98
	18		1,12

Визуальный контроль показал предпочтительность использования керамических пластин, предварительно подготовленных методом магнитно-абразивной обработки. При этом полученные результаты свидетельствуют о существующей зависимости геометрических параметров керамических пластин, а в частности радиуса скругления режущей кромки ρ , на обеспечение технологического качества прецизионных поверхностей изделий из хладостойкой

стали 40X2H2MA. Полученная поверхность с использованием предварительно подготовленных пластин имеет большую однородность и более низкую шероховатость по сравнению с поверхностью, полученной в результате чистового точения неподготовленными керамическими пластинами ВОК-60.

Применение керамических пластин, подготовленных методом магнитно-абразивной обработки, обеспечивает снижение шероховатости изделий из закаленной стали 40X2H2MA в 2,3 раза.

Наименьшее значение шероховатости хладостойкой стали $R_a = 0,8$ мкм достигается в 5-й серии испытаний, что соответствует радиусу скругления режущей кромки пластины $\rho = 27,16$ мкм (рисунок 4.3). Данные параметры пластины достигаются при магнитно-абразивной обработке при следующих варьируемых параметрах: $B = 0,5$ Тл, $t_{\text{мао}} = 10$ мин, $n_{\text{в.мао}} = 255 \text{ мин}^{-1}$, $S_{\text{п.мао}} = 75$ мм/мин.

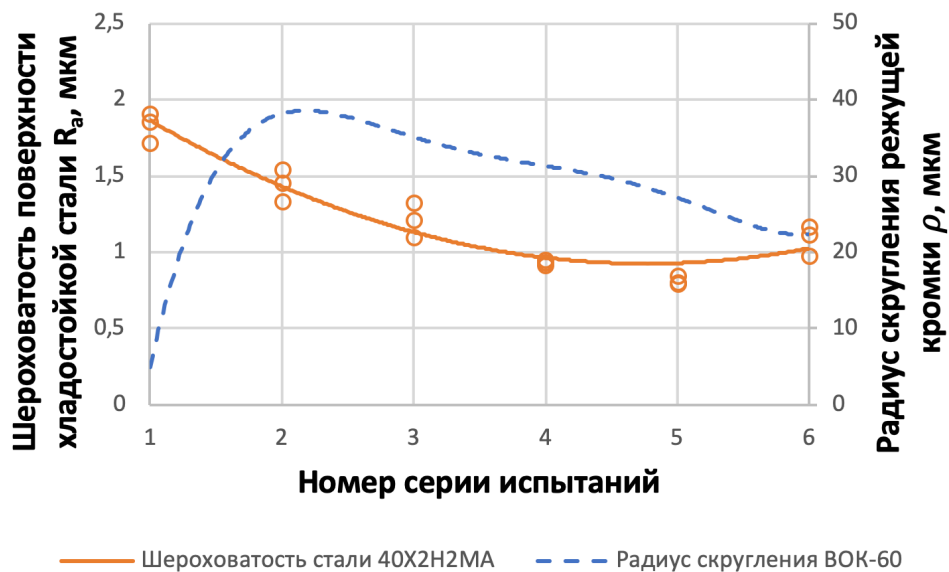


Рисунок 4.3 – Зависимость шероховатости поверхности R_a хладостойкой стали от величины скругления режущей кромки керамических пластин ВОК-60

В результате анализа полученных данных установлено, что обеспечение шероховатости поверхности хладостойкой стали 40X2H2MA в диапазоне значений R_a от 0,8 до 1,0 мкм возможно при радиусе скругления режущей кромки керамических пластин $\rho = 20-30$ мкм.

Шероховатость рабочих поверхностей керамических режущих пластин оказывает менее существенное влияние на снижение шероховатости R_a

хладостойкой стали 40Х2Н2МА. Снижение шероховатости передней и задней поверхностей керамических пластин в 4 раза снижает шероховатость прецизионной поверхности хладостойкой стали на 1,1 мкм (рисунок 4.4).

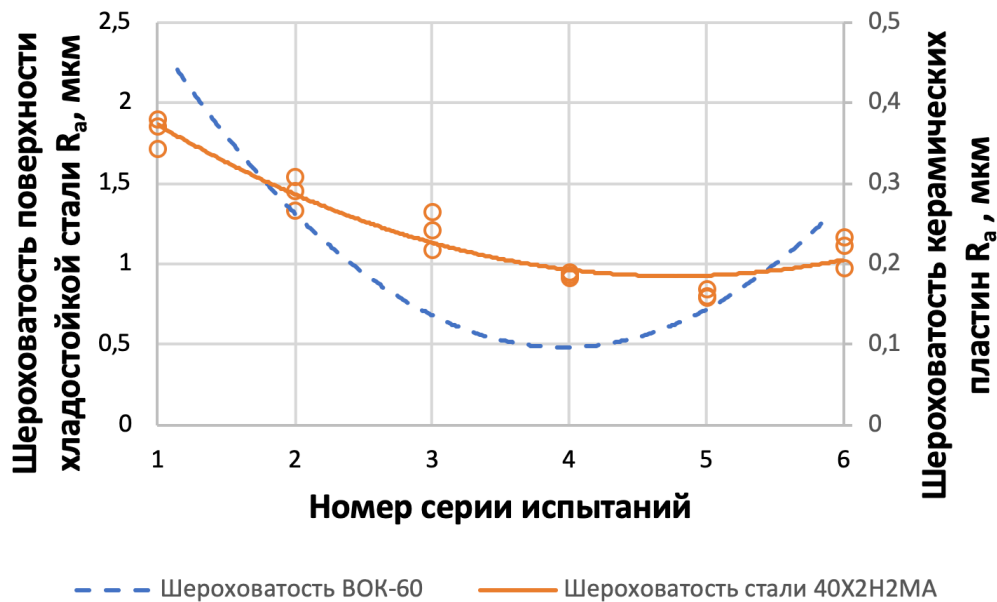


Рисунок 4.4 – Зависимость шероховатости поверхности R_a хладостойкой стали от шероховатости рабочих поверхностей керамических пластин ВОК-60

Анализ качества обработанной поверхности изделия из хладостойкой стали 40Х2Н2МА показал предпочтительность применения предварительно подготовленных керамических пластин методом магнитно-абразивной обработки. Применение данных пластин при чистовом точении хладостойких сталей позволяет снизить шероховатость поверхности в 2,3 раза и обеспечить более однородную структуру поверхностного слоя без видимых дефектов.

При этом можно утверждать, что наилучшие результаты достигаются при радиусе скругления режущей кромки пластины $\rho = 20-30$ мкм и шероховатости рабочих поверхностей инструмента $R_a = 0,25-0,3$ мкм.

4.3 Оценка износостойкости предварительно подготовленного инструмента методом магнитно-абразивной обработки при чистовом точении хладостойких сталей

Режущий инструмент в процессе работы подвергается интенсивному износу в условиях высоких значений давления и температуры, а также их больших перепадов.

Износ меняет геометрию режущего инструмента и, как следствие, силы и температуру резания, что в свою очередь негативно сказывается на качестве обрабатываемой поверхности, размерной точности и форме обработанной детали, а также может вызывать вибрации.

В результате износа происходит полное разрушение вершины резца вследствие:

- оплавления или пластической деформации режущего лезвия инструмента по причине высокой температуры резания (характерно для быстрорежущих инструментов);

- хрупкого разрушения, характерного для твердосплавного и керамического инструментов.

Экспериментальные исследования износа и стойкости керамических режущих пластин с различными геометрическими параметрами проводили на токарном станке 16К20 (рисунок 4.1) при соблюдении одинаковых режимных параметрах обработки: $V = 350$ м/мин, подача $S = 0,1$ мм/об, глубина $t = 0,05$ мм.

Критерием износа служила высота фаски износа, формируемая на задней поверхности режущей пластины ($h_3 = 0,3$ мм). По результатам исследования износа керамических режущих пластин по задней поверхности были построены графики, в которых учитывался пройденный путь инструментом (рисунок 4.5) и время работы до разрушения (рисунок 4.6).

Результаты исследования показали, что стойкость режущего инструмента, предварительно подготовленного методом магнитно-абразивной обработки, выше в 2,7 раза по сравнению с базовыми керамическими пластинами ВОК-60. Суммарный путь L , пройденный режущей кромкой базовой пластины до

наступления критического износа 5837 м, предварительно подготовленной пластиной 9432 м.

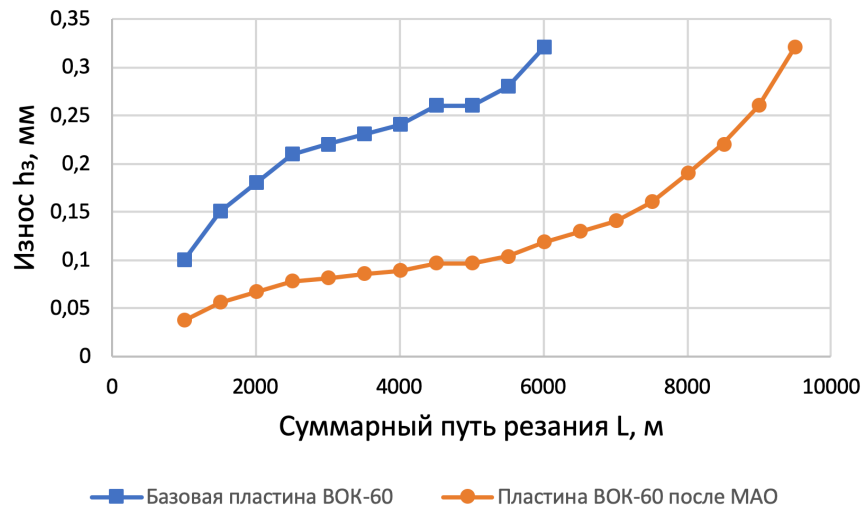


Рисунок 4.5 – Период стойкости керамического инструмента ВОК-60 в зависимости от суммарного пути резания L

Суммарное время резания керамическими режущими пластинами, предварительно подготовленными методом магнитно-абразивной обработки, в 1,7 раз больше по сравнению с базовой конфигурацией пластин ВОК-60. Критический износ пластин без предварительной подготовки наступает после 22 мин резания, подготовленными – после 37 мин.

Анализ данных, полученных в рамках исследования, однозначно говорит о преимуществах использования керамических режущих пластин после МАО в процессе чистового точения стали 40Х2Н2МА.

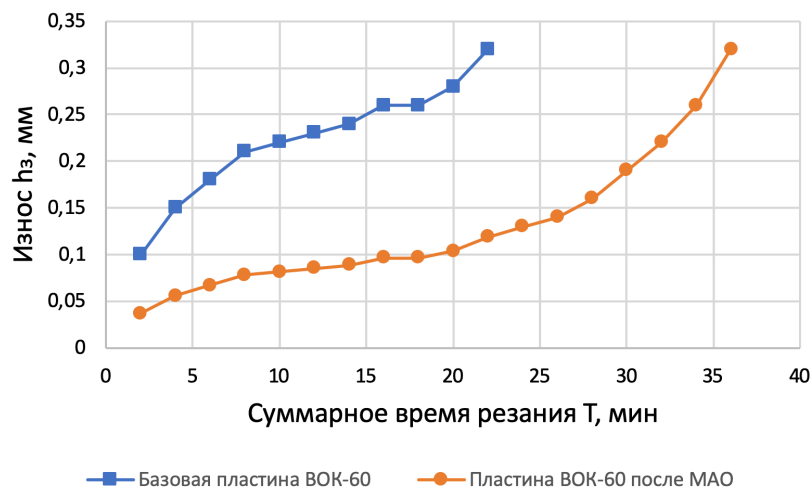


Рисунок 4.6 – Период стойкости керамического инструмента ВОК-60 в зависимости от суммарного времени резания T

В каждой из 6 серий испытаний использовались керамические пластины, подготовленные при разных варьируемых параметрах магнитно-абразивной обработки: электромагнитной индукции B , времени обработки $t_{\text{мао}}$, частоты вращения $n_{\text{в.мао}}$ и продольной подачи $S_{\text{п.мао}}$. Использование различных параметров предварительной обработки сформировали различный геометрический профиль керамических пластин, в частности величину скругления режущей кромки ρ .

На рисунке 4.7 представлены результаты анализа влияния радиуса скругления режущей кромки ρ на стойкость инструмента. Из полученных данных можно сделать вывод о существенном влиянии стойкости инструмента в зависимости от геометрии режущей кромки керамических режущих пластин. Максимальная стойкость инструмента достигается при радиусе скругления режущей кромки $\rho = 27\text{-}32$ мкм.

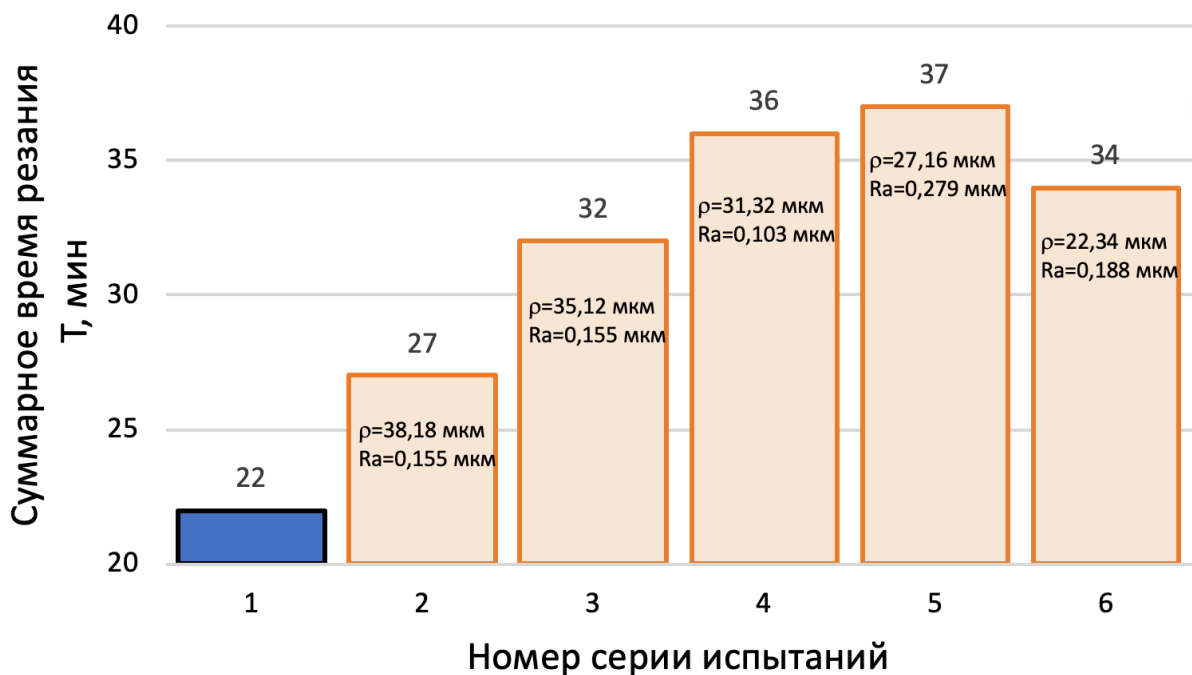


Рисунок 4.7 – Сравнительная стойкость керамических пластин ВОК-60 от радиуса скругления режущей кромки ρ

В процессе эксплуатации режущий инструмент проходит три стадии: приработка, нормальный износ и критический, при котором наблюдается сильный износ и разрушение режущей кромки. Отдельно отметим процесс приработки инструмента, который характеризуется повышенным износом режущих поверхностей по причине изменения первоначальной геометрии инструмента.

Величина износа в процессе приработки инструмента в 7...10 раз и выше, чем на стадии установившегося износа.

В период приработки изменяется радиус скругления режущей кромки ρ , который увеличивается или снижается, достигая оптимального значения. В процессе экспериментальных исследований было установлено изменение величины скругления режущей кромки относительно первоначальной в каждой из 6 серий образцов (рисунок 4.8).

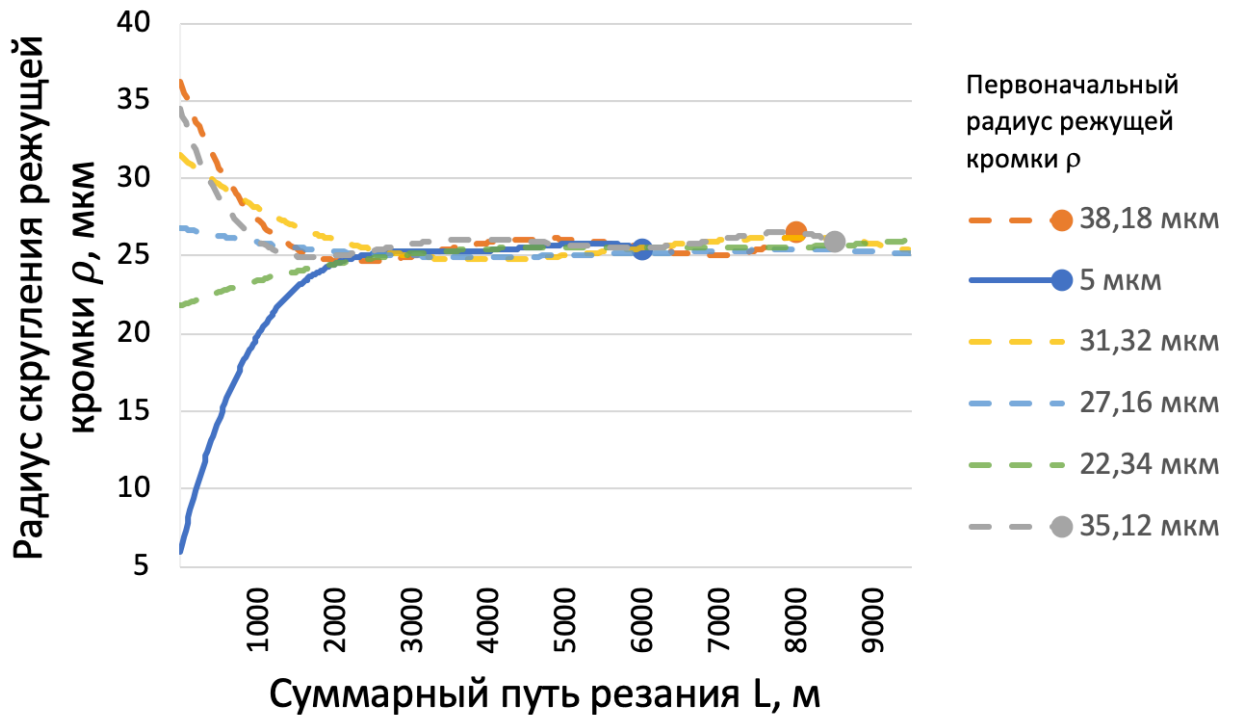


Рисунок 4.8 – Изменение радиуса скругления режущей кромки ρ с течением пройденного пути резания L

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о том, что чем большее изменение претерпевает радиус скругления режущей кромки в процесс достижения оптимального значения, тем ниже стойкость керамических режущих пластин.

Проведенный визуальный контроль поверхности пластин после прохождения 5837 м, что соответствует критическому износу керамической пластины ВОК-60 базовой конфигурации, свидетельствует о различной интенсивности износа режущих пластин, подготовленных магнитно-абразивным методом при соблюдении различных параметров обработки (рисунок 4.9).

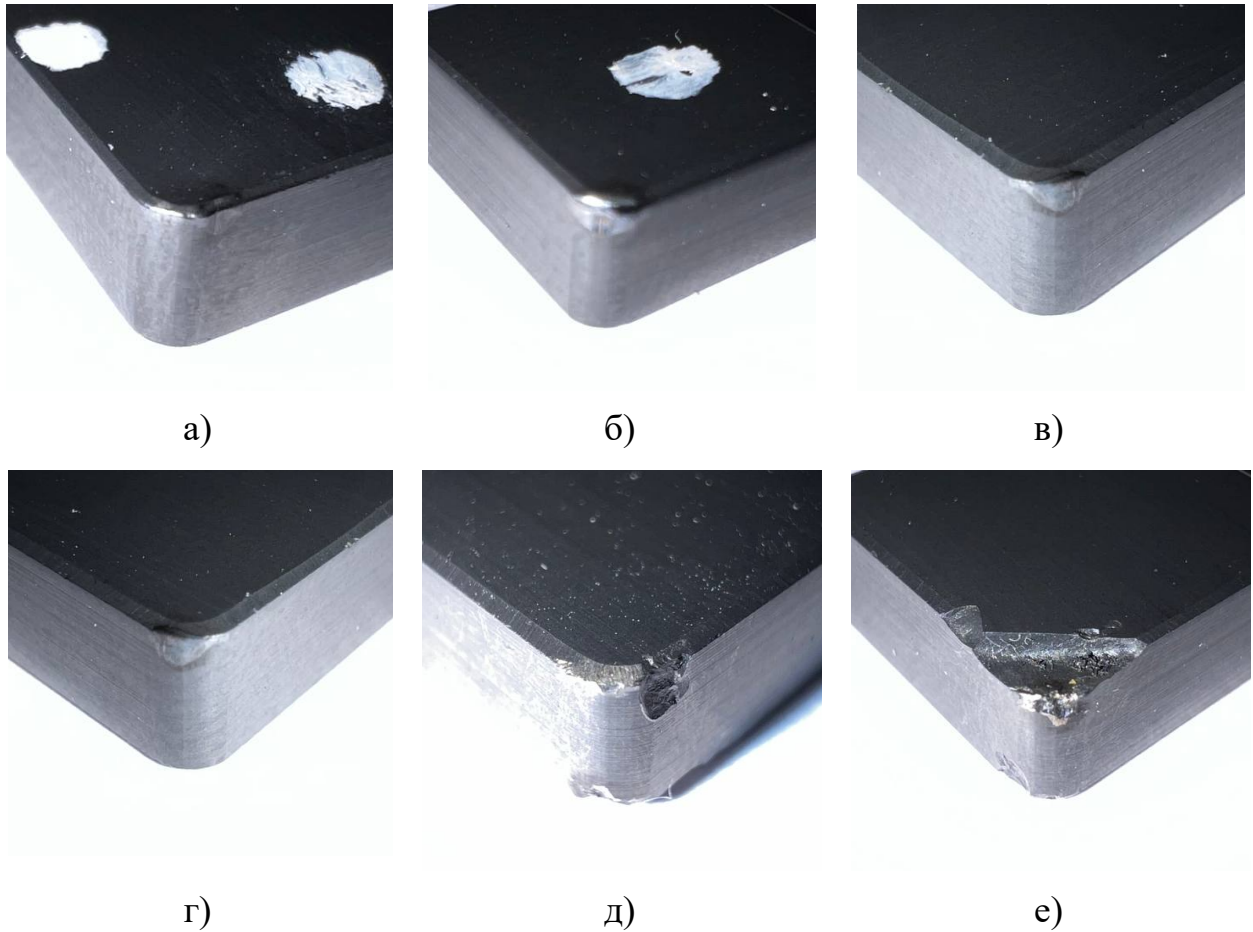


Рисунок 4.9 – Деградация поверхности керамических пластин после прохождения суммарно пути резания $L=5837$ м каждой из 6 серий образцов, где первоначальный радиус скругления ρ : а) 27,16 мкм, б) 22,16 мкм, в) 31,32 мкм, г) 35,12 мкм, д) 38,18 мкм, е) 5 мкм

4.4 Оценка влияния предварительно подготовленного инструмента методом магнитно-абразивной обработки на процесс динамической устойчивости механической обработки

Целью исследований является анализ влияния измененной геометрии и поверхностного слоя керамических режущих пластин, предварительно подготовленных методом магнитно-абразивной обработки, на технологию изготовления штока гидроцилиндра. Это позволит определить граничные условия устойчивости и назначить режимы механической обработки прецизионных поверхностей изделий из хладостойких сталей с применением инструмента, предварительно подготовленного методом магнитно-абразивной обработки.

В процессе исследования устойчивости технологической системы проводилась обработка стали 40X2H2MA с использованием керамических режущих пластин ВОК-60 стандартной конфигурации и предварительно подготовленных методом магнитно-абразивной обработки с различными технологическими параметрами. По результатам исследований был построен график области устойчивости при механической обработке (рисунок 4.10).

На диаграмме показаны кривые распределения граничных условий, представляющие области устойчивости системы при механической обработке заготовки керамическими режущими пластинами из серии испытаний №5 (рисунок 4.7), подготовленных при следующих режимных параметрах магнитно-абразивной обработки $B = 0,5$ Тл, $t_{\text{мао}} = 10$ мин, $n_{\text{в.мао}} = 255$ мин⁻¹, $S_{\text{п.мао}} = 75$ мм/мин, и при стандартных конфигурациях режущих пластин ВОК-60.

Из анализа графика видно, что правая граница области устойчивости характеризует механическую обработку стали 40X2H2MA с использованием керамических режущих пластин ВОК-60 как неустойчивый процесс с нестабильным состоянием. Из этого делаем вывод, что механическая обработка за пределами данной граничной области снижает шероховатость и точность обрабатываемой поверхности изделия по причине возникающих вибраций. Режимные параметры механической обработки левой границы области устойчивости описывают стабильность процесса обработки стали 40X2H2MA.

Режимные параметры механической обработки в точках K_1 и K_2 , где: K_1 – произвольная точка, принятая для процесса точения с использованием стандартных конфигураций режущих пластин; K_2 – точка для процесса механической обработки с предварительной подготовленной керамической пластиной, обеспечивают абсолютную устойчивость системы по режимам скорости резания. В точке K_3 , которая находится за границей параметров устойчивости механической обработки, система характеризуется как динамически неустойчивая.

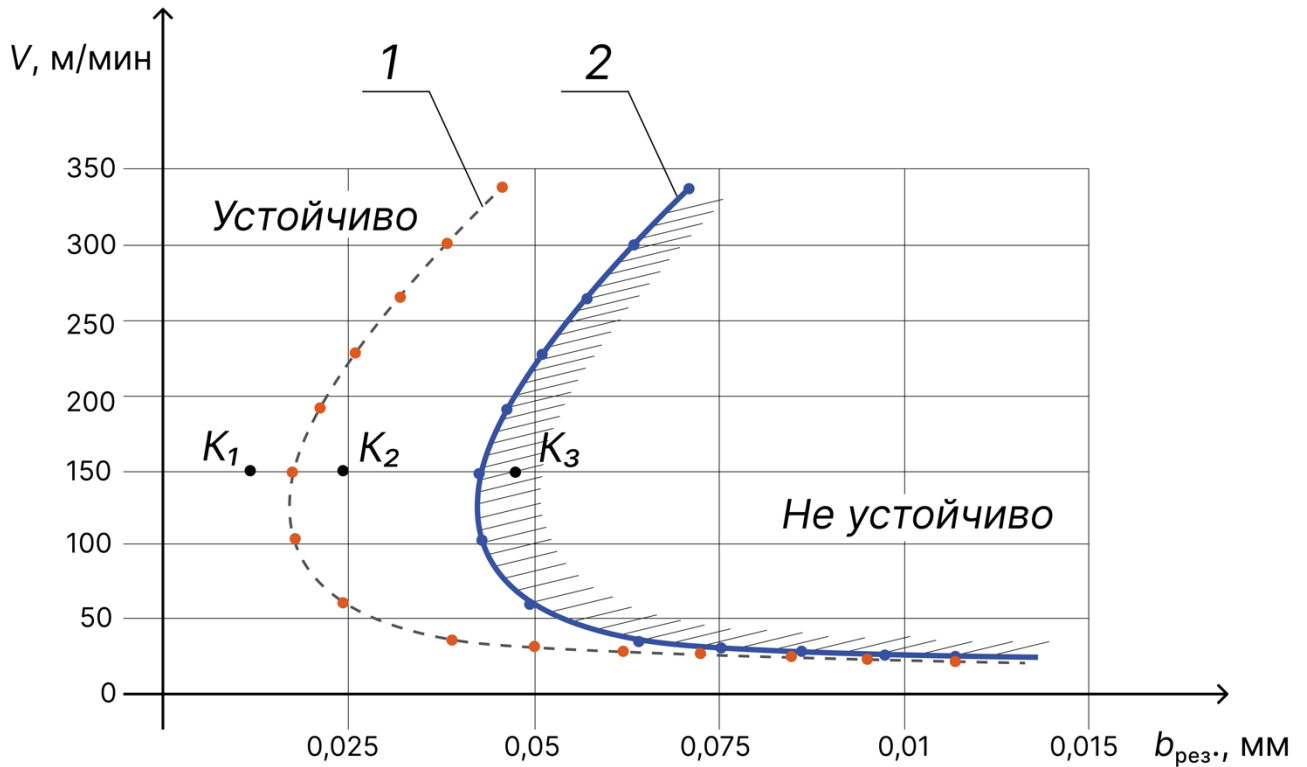


Рисунок 4.10 – Граница области устойчивости при обработке стали 40X2H2MA, где: 1 – стандартная конфигурация режущих пластин, 2 – предварительно подготовленные MAO керамические пластины

Оценка моделирования процесса проводилась на базе производственных ресурсов программы *NI LabVIEW 2013 SP1*, позволяющей использовать расчетные осциллограммы для анализа влияния на динамическую устойчивость технологических систем обработки предварительно подготовленных керамических пластин марки ВОК-60 при изготовлении штока гидроцилиндра.

Таким образом, в точке K_1 зафиксирован стабильный процесс обработки (рисунок 4.11). При тчении с использованием предварительно подготовленных керамических пластин методом магнитно-абразивной обработки K_2 отмечается снижение амплитуды колебательного процесса (рисунок 4.12) в сравнении с обработкой в точке K_3 (рисунок 4.13), находящейся за границей устойчивости.

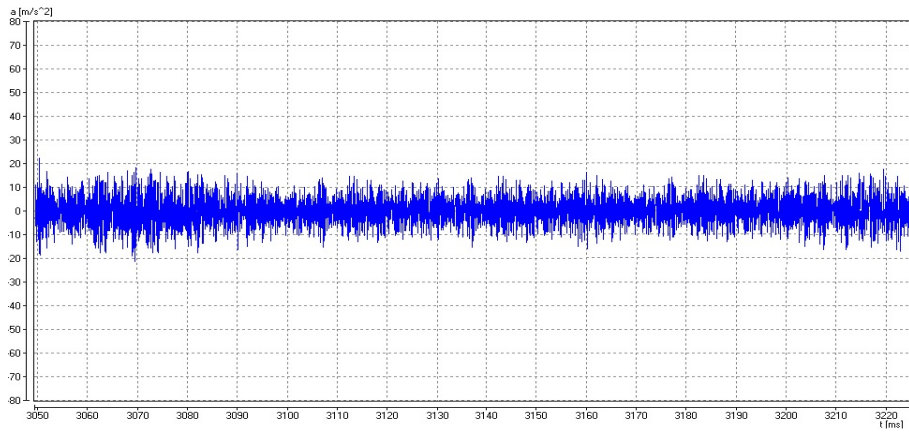


Рисунок 4.11 – Расчетные осциллограммы виброускорений с использованием керамических пластин ВОК-60 стандартной конфигурации при механической обработке в точке K_1

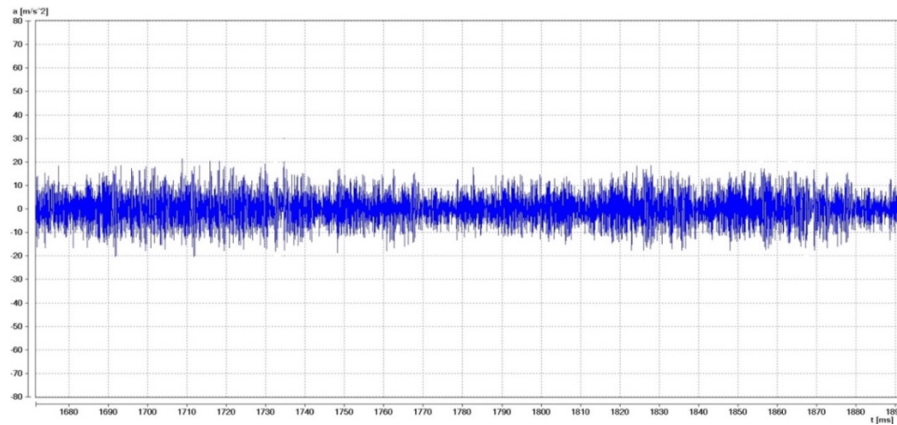


Рисунок 4.12 – Расчетные осциллограммы виброускорений с использованием керамических пластин ВОК-60 после МАО при механической обработке в точке K_2

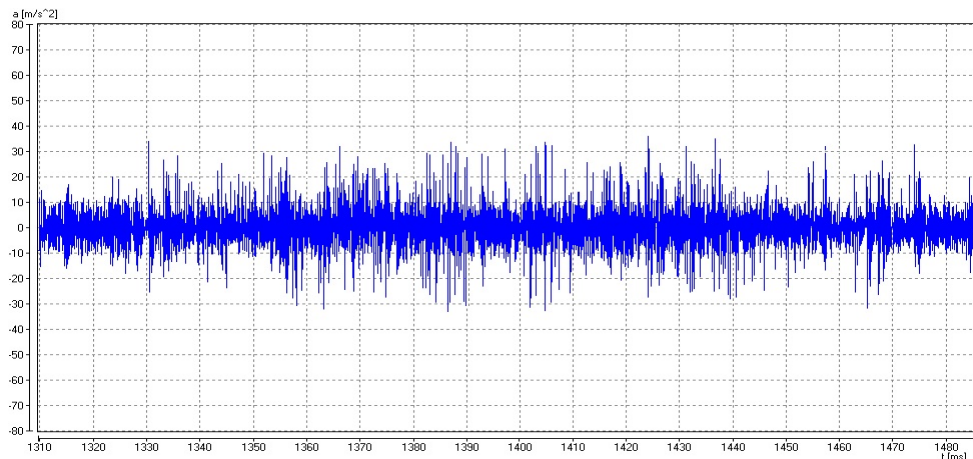


Рисунок 4.13 – Расчетные осциллограммы виброускорений с использованием керамических пластин ВОК-60 после МАО при механической обработке в точке K_3

На основе этих данных можно говорить о предпочтительности использования предварительно подготовленных керамических пластин методом магнитно-абразивной обработки по сравнению с традиционной конфигурацией режущего инструмента.

4.5 Совершенствование технологического процесса изготовления штока гидроцилиндра из хладостойкой стали

Изготовление штока гидроцилиндра – трудоёмкий процесс, связанный с высокими требованиями к качеству обрабатываемого изделия: точности и шероховатости поверхности. Типовой технологический процесс изготовления штоков гидроцилиндров представлен в таблице 4.2.

Особое внимание заслуживает финишная операция обработки штока, которая представлена круглошлифовальной операцией. В результате данной операции возникает эффект шаржирования поверхности абразивными частицами, а также возникает усталостная прочность и снижается износостойкость изделия. Все это негативно сказывается на эксплуатационных свойствах гидроцилиндра.

Таблица 4.2 – Типовой технологический процесс изготовления штока гидроцилиндра

Код операции	Операция
00	Заготовительная
05	Токарная
10	Токарно-винторезная
15	Токарно-фрезерная
20	Термическая
25	Круглошлифовальная
30	Операция технического контроля

В целях устранения негативных последствий было предложено изменить существующий технологический процесс изготовления штока гидроцилиндра, а именно заменить финишную круглошлифовальную операцию токарной с чистовым точением заготовки.

Проведенные исследования в разделе 4.2 настоящей диссертации подтвердили возможность применения токарной операции с чистовым точением в качестве альтернативной финишной операции. Новый технологический процесс представлен в таблице 4.3.

В результате предложенной новой технологии изготовления штока гидроцилиндра с применением предварительно подготовленного инструмента методом магнитно-абразивной обработки достигаются качественные требования, предъявляемые к изделию, с нивелированием негативных последствий круглошлифовальной операции.

Таблица 4.3 – Предложенный технологический процесс изготовления штока гидроцилиндра

Код операции	Операция
00	Заготовительная
05	Токарная
10	Токарно-винторезная
15	Токарно-фрезерная
20	Термическая
25	Токарная (чистовое точение)
30	Операция технического контроля

4.6 Практические рекомендации по технологическому обеспечению качества прецизионных поверхностей изделий из хладостойких сталей методом магнитно-абразивной обработки инструмента

Анализ результатов проведенных исследований позволяет сделать вывод об эффективности операции чистового точения предварительно подготовленным инструментом с обеспечением высокого качества прецизионных поверхностей изделий из хладостойкой стали. Предварительная подготовка инструмента производится методом магнитно-абразивной обработки, которая позволяет сформировать геометрический профиль режущей кромки керамических пластин марки ВОК-60 и снизить шероховатость передней и задней поверхностей.

Подготовленный инструмент имеет более высокую износостойкость и область устойчивости по сравнению со стандартной конфигурацией пластин.

Установлено, что при подготовке керамических режущих пластин методом магнитно-абразивной обработки при варьировании параметров электромагнитной индукции B , частоты вращения $n_{в.мао}$, продольной подачи $S_{п.мао}$ и времени обработки $t_{мао}$ формируется радиус скругления режущей кромки ρ в диапазоне от 20 до 40 мкм и достигается шероховатость передней и задней поверхностей $R_a = 0,1$ мкм. В процессе обработки за счет эластичной ферроабразивной щетки происходит стабильный механизм съема материала, который достигает $q = 0,0745$ г/см² с единицы площади. Процесс микрорезания, сопровождающий магнитно-абразивную обработку керамических пластин, позволяет сформировать микрорельеф инструмента, необходимый для последующей обработки прецизионных поверхностей изделий из хладостойкой стали.

Полученные режимные параметры магнитно-абразивной обработки керамических режущих пластин позволяют обеспечить бездефектную равномерную обработку кромок и поверхностей инструмента за счет применения магнитно-абразивного инструмента марки «АЛВОПОЛ» и СОЖ.

Режущий инструмент со сменными керамическими пластинами марки ВОК-60, подготовленными методом магнитно-абразивной обработки, применялся при обработке хладостойкой стали марки 40Х2Н2МА.

В результате проведенных исследований была установлена нелинейная зависимость влияния величины скругления режущей кромки ρ на достижение качественных характеристик поверхности изделия из хладостойкой стали 40Х2Н2МА. Наилучшие показатели шероховатости поверхности изделия $R_a = 0,8$ мкм были достигнуты при радиусе скругления режущей кромки в диапазоне от 20 до 30 мкм. При этом наблюдается снижение периода приработки инструмента, повышение износостойкости керамических режущих пластин в 2,7 раза и расширение области устойчивости при чистовом точении, которое заменяет круглошлифовальную финишную операцию в типовом технологическом процессе обработки штоков гидроцилиндра.

По результатам проведенных комплексных теоретических и экспериментальных исследований с последующим их анализом сформированы некоторые положения, которые следует рассматривать как практические рекомендации:

1. Для предварительной подготовки керамических режущих пластин марки ВОК-60 с формированием определенного радиуса скругления режущей кромки ρ и снижением шероховатости рабочих поверхностей R_a рекомендовано применение способа магнитно-абразивной обработки;

2. Рекомендуется проводить магнитно-абразивную обработку керамических режущих пластин в соответствии с разработанным способом (рисунок 2.1 и рисунок 2.2), а также использовать магнитно-абразивный инструмент, описанный во второй главе настоящей диссертации, а именно:

- в качестве магнитно-абразивного инструмента целесообразно применять ферроабразивный порошок марки «АЛВОПОЛ» фракцией $\Delta=180\dots250$ мкм;

- в качестве СОЖ рекомендованы масляные водорастворимые жидкости на эмульсионной основе;

- удержание магнитно-абразивного инструмента в рабочем пространстве рекомендуется осуществлять при величине индукции B не менее 0,1 Тл;

- рекомендуемая степень заполнения рабочего пространства ферроабразивным порошком не менее 0,8;

3. Магнитно-абразивную обработку рекомендуется проводить в рамках диапазонов установленных режимных параметров: частота вращения $n_{в,мао} = 100-600$ мин⁻¹; возвратно-поступательное движение вдоль полюсных наконечников в диапазоне значений $S_{п,мао} = 25-225$ мм/мин; время обработки в пределах $t_{мао} = 4-12$ мин; величина магнитной индукции в диапазоне $B = 0,35-0,95$ Тл;

4. Для подготовки керамических режущих пластин марки ВОК-60 с целью их дальнейшего использования в операция чистового точения хладостойкой стали 40Х2Н2МА с режимными параметрами: скорость резания $V = 350$ м/мин, глубина $t = 0,05$ мм, подача $S = 0,1$ мм/об, рекомендуется обеспечить радиус скругления режущей кромки ρ в диапазоне значений от 25 до 35 мкм;

5. Для обеспечения радиус скругления режущей кромки ρ в диапазоне значений от 25 до 35 мкм рекомендуется устанавливать следующие параметры магнитно-абразивной обработки керамических режущих пластин: магнитная индукция $B = 0,5$ Тл, время обработки $t_{\text{мао}} = 6$ мин, величина продольной подачи $S_{\text{п.мао}} = 175$ мм/мин и частота вращения $n_{\text{в.мао}} = 225$ мин⁻¹.

Результаты комплексного экспериментального исследования, проведенного с целью определения закономерности влияния технологических факторов и геометрических параметров инструмента на основе предварительно подготовленной режущей керамики методом магнитно-абразивной обработки на обеспечение качества прецизионных поверхностей изделий из закаленной стали, показывают эффективность предложенного метода и обеспечивают достижение шероховатости $R_a = 0,8$ мкм с возможностью замены финишной операции шлифования чистовым точением, а также увеличивают износостойкость режущих пластин в 2,7 раза, уменьшают период приработки инструмента и увеличивают границы области устойчивости при механической обработке хладостойкой стали 40X2H2MA.

4.7. Выводы по четвертой главе

1. Проведены экспериментальные исследования по определению влияния предварительной подготовки керамических режущих пластин марки ВОК-60 методом магнитно-абразивной обработки на обеспечение технологического качества прецизионных поверхностей изделий из хладостойкой стали 40X2H2MA с обеспечением шероховатости поверхности $R_a = 0,8$ мкм;

2. Обработка заготовки из хладостойкой стали 40X2H2MA проводилась на операции чистового точения при скорости резания $V = 350$ м/мин, глубине $t = 0,05$ мм и подаче $S = 0,1$ мм/об с использованием пяти серий образцов керамических пластин, подготовленных при различных режимных параметрах магнитно-абразивной обработки;

3. Результаты экспериментальных исследований продемонстрировали предпочтительность использования керамических режущих пластин с радиусом скругления режущей кромки $\rho = 20-30$ мкм, который достигается при следующих

параметрах предварительной магнитно-абразивной обработки инструмента: магнитная индукция $B = 0,5$ Тл, время обработки $t_{\text{мао}} = 6$ мин, величина продольной подачи $S_{\text{п.мао}} = 175$ мм/мин и частота вращения $n_{\text{в.мао}} = 225$ мин⁻¹;

4. Использование предварительно подготовленных керамических режущих пластин продемонстрировало снижение периода приработки инструмента, увеличение его износостойкости в 2,7 раза, а также увеличение границы области устойчивости при обработке закаленной хладостойкой стали 40Х2Н2МА;

5. При механической обработке изделий из хладостойких сталей их качественные характеристики прецизионных поверхностей обеспечиваются на операции чистового точения, что позволяет сократить технологический процесс за счет исключения операции шлифования;

6. Предложены практические рекомендации по использованию магнитно-абразивной обработки керамических режущих пластин в качестве предварительной операции подготовки инструмента, что позволило обеспечить шероховатость прецизионной поверхности изделия из хладостойкой стали $R_a = 0,8$ мкм на операции чистового точения, сократить технологический процесс изготовления штока гидроцилиндра, снизить период приработки инструмента, увеличить его износостойкость в 2,7 раза, а также увеличить границы области устойчивости инструмента при обработке закаленной хладостойкой стали 40Х2Н2МА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предложено новое решение актуальной научной задачи – разработка метода технологического обеспечения повышения качества прецизионных поверхностей изделий из хладостойких сталей за счет использования инструмента на основе режущей керамики с измененной геометрией режущей кромки и уменьшенной шероховатостью передней и задней поверхностей, предварительно достигнутой способом магнитно-абразивной обработки.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. На основании проведенного анализа установлено, что на качество обработки прецизионных поверхностей изделий из хладостойкой стали 40Х2Н2МА существенное влияние оказывает инструмент, а именно величина радиуса скругления режущей кромки, и качество передней и задней поверхности инструмента.

2. Разработан способ магнитно-абразивной обработки режущих кромок и рабочих поверхностей инструмента, обеспечивающий равномерный сьем материала вдоль всей режущей кромки и формирующий радиус скругления в диапазоне заданных значений, а также обеспечивающий высокое качество передней и задней поверхностей инструмента (Патент №212068).

3. Разработанный способ включает в себя специальную схему сочетания рабочих движений $n_{в.мао}$, $S_{п.мао}$, $V_{осц.мао}$ в диапазонах значений частоты вращения $n_{в.мао} = 100-600 \text{ мин}^{-1}$ с подачей державки с инструментом вдоль магнитных наконечников $S_{п.мао} = 25-225 \text{ мм/мин}$ и магнитной индукции $B = 0,35-0,95 \text{ Тл}$, использование ферроабразивного порошка марки «АЛВОПОЛ» с фракцией $\Delta=180...250 \text{ мкм}$ и масляных водорастворимых смазочно-охлаждающих жидкостей на эмульсионной основе.

4. Получены регрессионные математические зависимости, позволяющие определить значения шероховатости поверхности, удельного сьем материала с единицы площади и радиус скругления режущей кромки в зависимости от:

величины магнитной индукции, времени обработки, частоты вращения и величины продольной подачи заготовки.

5. Установлено, что в процессе магнитно-абразивной обработки режущей кромки инструмента марки ВОК-60, значение удельного съема материала с единицы площади достигает $q = 0,0745 \text{ г/см}^2$, что позволяет нивелировать дефекты предыдущей обработки, сформировать радиус скругления режущей кромки в диапазоне от 20 до 40 мкм и обеспечить шероховатость поверхности режущей пластины $R_a = 0,1 \text{ мкм}$, что в 4-5 раз ниже по сравнению с исходной.

6. Разработаны практические рекомендации применения способа магнитно-абразивной обработки режущих кромок и рабочих поверхностей инструмента в условиях реального производства с диапазоном режимных параметров $V = 0,35-0,95 \text{ Тл}$, $t_{\text{мао}} = 4-12 \text{ мин}$, $S_{\text{п.мао}} = 25-225 \text{ мм/мин}$, $n_{\text{в.мао}} = 100-600 \text{ мин}^{-1}$.

7. Применение способа магнитно-абразивной обработки в качестве предварительной операции по подготовке режущего инструмента позволяет уменьшить период его приработки и увеличить износостойкость инструмента в 2,7 раза.

8. Применение предварительно подготовленного инструмента на основе режущей керамики методом магнитно-абразивной обработки позволило заменить процесс шлифования финишным процессом обработки хладостойких сталей точением и достичь шероховатости обрабатываемой поверхности $R_a = 0,8 \text{ мкм}$.

9. Результаты проведенных исследований были внедрены в учебный процесс кафедры «Машиностроения» Санкт-Петербургского горного университета, а также прошли промышленную апробацию на производственных предприятиях АО ВО «Электроаппарат» и АО «Завод «Энергия».

10. Перспективы дальнейшего развития диссертационного исследования заключаются в разработке технологии предварительной подготовки инструмента магнитно-абразивной обработки для различных видов операций механической обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдрахманов, И.А. Совершенствование технологии проверки и диагностирования гидроцилиндров / И.А. Абдрахманов, В.С. Наталенко // Российский Электронный Научный Журнал. – 2013. – № 6 (6). – С. 3-7.
2. Акулович, Л.М. Ферроабразивный порошок для магнитно-абразивной обработки на основе аморфных металлических сплавов / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев, В.Е. Бабич // Вестник Полоцкого Государственного Университета. Серия В: Прикладные Науки. – 2006. – № 12. – С. 89-92.
3. Акулович, Л.М. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей различного профиля / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев. – Минск : БГАТУ, 2013. – 372 с.
4. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле : Наука и техн. прогресс НТП / ред. П.И. Яшерлицын, М.Т. Забавский, Л.М. Кожуро, Л.М. Акулович. – Минск : Наука и техника, 1988. – 270 с.
5. Амосов, И.С. Точность, вибрации и чистота поверхности при токарной обработке : Б-ка токаря-новатора / И.С. Амосов, В.А. Скраган, М.А. Ансеров. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва ; Ленинград : Машгиз. [Ленингр. отд-ние], 1958. – Вып. Вып. 9. – 91 с.
6. Армарего, И.А. Обработка металлов резанием. Обработка металлов резанием / И.А. Армарего, Р.Х. Браун. – Москва : Машиностроение, 1977. – 325 с.
7. Аршинов, В.А. Резание металлов и режущий инструмент: Учебник для машиностроит. техникумов. Резание металлов и режущий инструмент / В.А. Аршинов, Г.А. Алексеев. – 2-е изд., доп. и перераб. – Москва : Машиностроение, 1968. – 480 с.
8. Бабич, В.И. Технология финишной магнитно-абразивной обработки сборного породоразрушающего инструмента : дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / В.И. Бабич. – Минск : ГНУ «Физико-технический институт» НАН Беларуси, 2009. – 158 с.

9. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. – Ленинград : Машиностроение Ленингр. отделение, 1986. – 172 с.
10. Барон, Ю.М. Влияние радиуса закругления режущей кромки инструментов из быстрорежущей стали на их стойкость : Н.-т. конфер. «Повышение эффективности обработки конструкционных материалов». - Улан-Уде: Вост. - Сибир. технолог.ин-т / Ю.М. Барон, К.А. Халбаев. – 1985. – С. 87-88.
11. Благовский, О.В. Управление формированием остаточных напряжений в ответственных деталях при их изготовлении с использованием ультразвуковых колебаний : дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / О.В. Благовский. – 2015. – 151 с.
12. Бобров, В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение. – 1973. – 344 с.
13. Богомолов, Н.И. Основные процессы при взаимодействии абразива и металла : дис. ... докт. техн. наук: 05.00.00 / Н.И. Богомолов. – Киев, 1967. – 43 с.
14. Болобов, В.И. Методика испытаний трубопроводных сталей на стойкость к «ручейковой» коррозии / В.И. Болобов, Г.Г. Попов // Записки Горного Института. – 2021. – Т. 252. – С. 854-860.
15. Борисов, Г.А. Анализ условий эксплуатации дизельных двигателей в условиях пониженных температур / Г.А. Борисов, И.Н. Колодяжная, Ю.В. Ичанкин // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2013. – № 1 (17). – С. 38-43.
16. Ваксер, Д.Б. Пути повышения производительности абразивного инструмента при шлифовании / Д.Б. Ваксер. – Москва; Ленинград : Машиностроение. [Ленингр. отд-ние], 1964. – 123 с.
17. Виноградов, Ю.В. Моделирование процесса резания металла методом конечных элементов : дис. ...канд. техн. наук: 05.13.18 / Ю.В. Виноградов. – Тула, 2004. – 119 с.
18. Влияние легирования на структуру и свойства высокопрочной хладостойкой стали после термической и термомеханической обработки / Е.И. Хлусова, С.А. Голосиенко, Г.Д. Мотовилина, У.А. Пазилова // Вопросы материаловедения. – 2007. – № 1 (49). – С. 20-32.

19. Влияние термической обработки и микролегирования на хладноломкость сталей северного исполнения / С.Б. Ермаков, В.В. Каргинова, Ю.П. Солнцев, А.К. Андреев // *Металлы*. – 2010. – № 4. – С. 67-74.
20. Волков, В.Н. Показатели надежности гидропривода / В.Н. Волков, В.А. Бурмистров, О.М. Тимохова // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 4. – С. 193.
21. Вологжанина, С.А. Оценка ресурса и обобщение влияния процессов длительной эксплуатации на структуру и свойства хладостойких сталей / С.А. Вологжанина. – 2004. – С. 32.
22. Воронов, В.Ф. Судовые гидравлические машины: Учебник для вузов по специальности «Судовые силовые установки». Судовые гидравлические машины / В.Ф. Воронов, А.П. Арцыков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Судостроение, 1976. – 301 с.
23. Гейчук, В.Н. Кинематика формирования кромок магнитно-абразивной обработкой / В.Н. Гейчук, А.Ю. Гаврушкевич // *Машиностроение: Сетевой Электронный Научный Журнал*. – 2014. – Т. 2. – № 4. – С. 25-32.
24. Грановский, Г.И. Резание металлов: Учеб. для машиностроит. и приборостроит. спец. вузов. Резание металлов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – Москва : Высш. шк., 1985. – 304 с.
25. Дальский, А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин : Б-ка технолога / А.М. Дальский. – Москва : Машиностроение, 1975. – 223 с.
26. Ефремов, В.Д. Повышение качества рабочих кромок деталей и инструмента при упрочняющем шлифовании : дис. ...канд. техн. наук: 05.02.08 / В.Д. Ефремов. – Минск, 1984. – 253 с.
27. Жданович, В.И. Исследование процесса магнитно-абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей : дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / В.И. Жданович. – Минск : АН БССР. Отд-ние физ.-техн. наук, 1974. – 24 с.
28. Жетесова, Г.С. Анализ разрушений и деформаций элементов конструкций секций механизированных крепей / Г.С. Жетесова // *Труды университета*. – 2002. – № 1. – С. 9-11.

29. Исследование влияния радиуса скругления режущей кромки на шероховатость поверхности деталей / В.В. Максаров, **М.А. Попов**, В.И. Болобов, В.Г. Куфаев // *Металлообработка*. – 2023. – № 2 (134). – С. 8-18.
30. Карпенко, В.Г. Зимняя эксплуатация колесных и гусеничных машин / В.Г. Карпенко. – Москва : Воениздат, 1958. – 256 с.
31. Кексин, А.И. Повышение качества внутренних резьбовых поверхностей на основе предварительного магнитно-абразивного полирования сложнопрофильного инструмента : дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / А.И. Кексин. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский горный университет, 2017. – 204 с.
32. Криворучко, Д.В. Повышение эффективности процессов чистовой обработки на основе аналитического моделирования силового взаимодействия лезвия с заготовкой : дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Д.В. Криворучко. – Сумы : Сумский гос. ун-т., 2002. – 205 с.
33. Ливанова, О.В. Деграция механических свойств и параметров сопротивления разрушению феррито-перлитных и перлитных сталей при длительной эксплуатации / О.В. Ливанова // *Сборник рефератов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Серия 16: 29. Физика. 30. Механика. 41. Астрономия. 89. Космические исследования*. – 2007. – № 4. – С. 142.
34. Макаренко, К.В. Исследование стойкости многогранных неперетачиваемых пластин при токарной обработке термически упрочненной стали 40X2H2MA / К.В. Макаренко, А.В. Толстяков // *Вестник Брянского Государственного Технического Университета*. – 2018. – № 6 (67). – С. 11-15.
35. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания : Б-ка технолога / А. Д. Макаров. – Москва : Машиностроение, 1976. – 278 с.
36. Максаров, В.В. Обеспечение качества подготовки кромок листовых изделий из алюминия и его сплавов перед сваркой / В.В. Максаров, А.И. Кексин, И.А. Филипенко // *Металлообработка*. – 2020. – № 3 (117). – С. 47-55.
37. Маргулис, Д.К. Проектирование режущего инструмента (зуборезный инструмент): Учеб. пособие. Проектирование режущего инструмента (зуборезный инструмент) / Д.К. Маргулис, А.А. Рыскин, В.М. Меньшаков. – Челябинск : ЧПИ, 1977. – 94 с.

38. Маслов, Е.Н. Основные направления в развитии теории резания абразивным, алмазным и эльборовым инструментом : Новости технологии: Серия «Обработка деталей абразивным, алмазным и эльборовым инструментом» / Е.Н. Маслов, Н.В. Постникова. – Москва : Машиностроение, 1975. – 48 с.
39. Матери, И.В. Особенности эксплуатации специальной техники в условиях Крайнего Севера / И.В. Матери, М.С. Корытов, Н.Ю. Деревсков // Наука и военная безопасность. – 2021. – № 3 (26). – С. 79-83.
40. Металловедение и технология металлов. Металловедение и технология металлов / ред. Ю.П. Солнцев, В.А. Веселов, В.П. Демянцевич. – Москва : Металлургия, 1988. – 511 с.
41. Микроструктура режущей керамики, как фактор эффективности процесса механической обработки / А.Д. Халимоненко, Е.Г. Злотников, И.В. Горшков, **М.А. Попов**. // Сборник научных трудов Международного семинара «Нанозифика и наноматериалы», Санкт-Петербург. – 2020. – С. 399-402.
42. Наумов, В.А. Роль радиуса округления режущей кромки в процессе резания : Вопросы автоматизации контроля и технологии машиностроения. - Омск / В.А. Наумов. – 1970. – С. 93-97.
43. Нинул, А.С. Оптимизация целевых функций: Аналитики. Численные методы. Планирование эксперимента. Оптимизация целевых функций / А.С. Нинул. – Москва : Физматлит, 2009. – 335 с.
44. Новик, Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов. – Москва : Машиностроение, 1980. – 304 с.
45. Нураков, С.Н. Влияние износа деталей гидроцилиндра на технико-экономические показатели гидроприводов и экологические показатели дорожных машин / С.Н. Нураков, А.К. Томашец, В.В. Савинкин // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2009. – № 12. – С. 22-26.
46. Оликер, В.Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий / В.Е. Оликер. – Москва : Металлургия, 1990. – 175 с.
47. Основы технологии машиностроения. Этапы проектирования и точность технологических процессов: учебное пособие для студентов высших

учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки 150400 «Технологические машины и оборудование» и 150900 «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств» : Машиностроение в политехническом университете. Основы технологии машиностроения. Этапы проектирования и точность технологических процессов / ред. Э.Л. Жуков, С.Л. Мурашкин. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического ун-та, 2008. – 407 с.

48. Основы учения о резании металлов и режущий инструмент: Учеб. пособие для машиностроит. техникумов. Основы учения о резании металлов и режущий инструмент / ред. С.А. Рубинштейн, Г.В. Левант, Н.М. Орнис, Ю.С. Тарасевич. – Москва : Машиностроение, 1968. – 392 с.

49. Петрешин, Д.И. Технологическое обеспечение шероховатости обрабатываемых поверхностей деталей машин на основе адаптивного управления : дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Д.И. Петрешин. – Брянск, 2001. – 166 с.

50. Попелюх, П.А. Комбинированная термомеханическая обработка стали с мартенсито-бейнитным превращением аустенита / П.А. Попелюх, А.И. Попелюх, М.Р. Юркевич // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 2 (59). – С. 62-68.

51. **Попов, М.А.** Технология машиностроения как составляющая часть базы технических знаний подготовки студентов / М.А. Попов, А.Д. Халимоненко // Сборник научных трудов III Всероссийской научной конференции «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса». – 2020. – С. 742-746

52. **Попов, М.А.** Влияние радиуса округления режущей кромки на повышение качества поверхностного слоя детали / М.А. Попов, В.В. Максаров, И.А. Бригаднов // Известия Тульского Государственного Университета. Технические Науки. – 2021. – № 9. – С. 637-644.

53. **Попов, М.А.** Повышение износостойкости шарошечных долот путем нанесения плазменного безвакуумного тонкопленочного покрытия / М.А. Попов // Металлообработка. – 2019. – № 5 (113). – С. 34-41.

54. **Попов, М.А.** Формирование инновационной образовательной среды для подготовки молодых специалистов минерально-сырьевого комплекса / М.А. Попов,

И.В. Горшков // Сборник научных трудов IV Всероссийской научной конференции «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса». – 2021. – С. 291-294

55. Принципы легирования, фазовые превращения, структура и свойства хладостойких свариваемых судостроительных сталей / И.В. Горынин, В.В. Рыбин, В.А. Малышевский, Е.И. Хлусова // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2007. – № 1 (619). – С. 9-15.

56. Приходько, С.П. Магнитно-абразивное полирование с применением индукторов на постоянных магнитах : дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / С.П. Приходько. – Ленинград, 1983. – 253 с.

57. Прогрессивные способы формообразования поверхностей штоков гидроцилиндров / Ж.А. Мрочек, Г.Ф. Шатуров, А.А. Жолобов, Д.Г. Шатуров // *Наука и техника*. – 2009. – № 1. – С. 14-18.

58. Производство абразивных материалов / ред. А.С. Полубелова, В.Н. Крылов, В.В. Карлин, И.С. Ефимова. – Ленинград : Машиностроение. [Ленингр. отд-ние], 1968. – 179 с.

59. Реченко, Д.С. Исследование процесса резания труднообрабатываемых материалов на микроуровне / Д.С. Реченко // *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты*. – 2019. – Т. 21. – № 2. – С. 18-25.

60. Сакулевич, Ф.Ю. Объемная магнитно-абразивная обработка / Ф.Ю. Сакулевич, Л.М. Кожуро. – Минск : Наука и техника, 1978. – 168 с.

61. Сакулевич, Ф.Ю. Магнитно-абразивная обработка точных деталей / Ф.Ю. Сакулевич, Л.К. Минин, Л.А. Олендер. – Минск : Вышэйш. школа, 1977. – 287 с.

62. Сакулевич, Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф.Ю. Сакулевич, П.И. Ящерицын. – Минск : Наука и техника, 1981. – 327 с.

63. Сидняев, Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: учебное пособие для магистров: учебное пособие для студентов и аспирантов вузов, обучающихся по специальности «Прикладная математика» : Магистр. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных / Н.И. Сидняев. – Москва : Юрайт, 2012. – 399 с.

64. Синопальников, В.А. Радиус округления режущих кромок твердосплавного инструмента : Станки и инструмент / В.А. Синопальников. – 1965. – Т. №6. – С. 35-37.
65. Скворчевский, Н.Я. Эффективность магнитно-абразивной обработки / Н.Я. Скворчевский, Э.Н. Федорович, П.И. Ящерицын. – Минск : Навука і тэхніка, 1991. – 214 с.
66. Скороходов, С.В. Особенности лезвийной обработки с малыми толщинами среза : дис. ...канд. техн. наук: 05.03.01 / С.В. Скороходов. – Иркутск, 2006. – 167 с.
67. Сосновский, Л.А. О взаимосвязи между основными характеристиками механических свойств стали / Л.А. Сосновский // Заводская Лаборатория. – 1991. – Т. 57. – № 6. – С. 44-45.
68. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г. Суслов. – Москва : Машиностроение, 1987. – 206 с.
69. Табенкин, А.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / А.Н. Табенкин, С.Б. Тарасов, С.Н. Степанов. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического ун-та, 2007. – 133 с.
70. Талантов, Н.И. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н.И. Талантов. – Москва : Машиностроение, 1992. – 240 с.
71. Технологические особенности магнитно-абразивной обработки в условиях цифровых технологий / В.В. Максаров, А.И. Кексин, И.А. Филипенко, И. А. Бригаднов // Металлообработка. – 2019. – № 4 (112). – С. 3-10.
72. Глустый, И. Автоколебания в металлорежущих станках / И. Глустый, В.В. Шварц, Л. Шпачек. – Москва : Машгиз, 1956. – 395 с.
73. Точность механической обработки и пути ее повышения / ред. А.П. Соколовский. – Москва ; Ленинград : Машгиз. [Ленингр. отд-ние], 1951. – 488 с.
74. Трент, Э.М. Резание металлов / Э.М. Трент, Г.И. Айзеншток. – Москва : Машиностроение, 1980. – 263 с.

75. Тытарь, И.В. Подготовка мобильных машино-дорожных комплексов к эксплуатации в условиях Крайнего Севера / И.В. Тытарь. – Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2016. – С. 40-44.

76. Устройство для крепления режущих пластин. Патент № 212068 U1 Российская Федерация, МПК В23Q 3/06 (2006.01), МПК В23Р 15/28 (2006.01): №2022103148: заявл. 09.02.2022: опубл. 05.07.2022 / В.В. Максаров, А.Д. Халимоненко, А.И. Кексин, **М.А. Попов**. – заявитель СПГУ. – 9 с.: ил

77. Хадиуллин, С.Х. Повышение эффективности использования инструментальных твердых сплавов на основе прогнозирования их режущих свойств : дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / С.Х. Хадиуллин. – Уфа, 2011. – 144 с.

78. Халимоненко, А.Д. Обработка изделий цилиндрической формы методом магнитно-абразивной обработки с предварительным травлением нанослоя поверхности заготовки / А.Д. Халимоненко, **М.А. Попов**, И.В. Горшков // Сборник научных трудов Международного симпозиума «Нанозифика и наноматериалы», Санкт-Петербург. – 2021. – С. 317-322.

79. Халимоненко, А.Д. Формирование микрорельефа при магнитно-абразивной обработке режущих керамических пластин / А.Д. Халимоненко, **М.А. Попов**, А.С. Кузьмина // Сборник научных трудов Международного симпозиума «Нанозифика и наноматериалы», Санкт-Петербург. – 2022. – С. 325-331.

80. Хомич, Н.С. Магнитно-абразивная обработка изделий: монография / Н.С. Хомич. – Минск : БНТУ, 2006. – 218 с.

81. Хомич, Н.С. Магнитно-абразивная обработка: технология и оборудование : Сер. 55.01, Машиностроение и металлообработка Обзор. информ. Беларус. НИИ НТИ и техн.-экон. исслед. Магнитно-абразивная обработка / Н.С. Хомич. – Минск : БелНИИНТИ, 1991. – 47 с.

82. Хомич, Н.С. Повышение эффективности магнитно-абразивной обработки деталей применения новых ферромагнитных абразивных материалов : дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Н.С. Хомич. – Минск : Академия наук Белорусской ССР, Физико-технический институт, 1981. – 204 с.

83. Ящерицын, П.И. Шлифование металлов / П.И. Ящерицын, Е.А. Жалнерович. – Минск : Беларусь, 1963. – 356 с.

84. Ящерицын, П.И. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов / П.И. Ящерицын, А.Г. Зайцев, А.И. Барботько. – Минск : Наука и техника, 1976. – 325 с.
85. Ящерицын, П.И. Чистовая обработка деталей в машиностроении: учеб. пособие. Чистовая обработка деталей в машиностроении / П.И. Ящерицын, А.Н. Мартынов. – Минск : Вышэйшая школа, 1983. – 191 с.
86. Ящерицын, П.И. Повышение эксплуатационных свойств шлифованных поверхностей / П.И. Ящерицын. – Минск : Наука и техника, 1966. – 384 с.
87. Ящерицын, П.И. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П.И. Ящерицын. – Минск : Физико-технический ин-т, 1997. – 416 с.
88. Analysis of residual stress and work-hardened profiles on Inconel 718 when face turning with large-nose radius tools | SpringerLink : The international journal of advanced manufacturing technology volume 71 / A. Madariaga, J.A. Esnaola, E. Fernandez [и др.]. – 2014. – С. 1587-1598.
89. Determining tool/chip temperatures from thermography measurements in metal cutting / M. Saez-de-Buruaga, D. Soler, P.X. Aristimuño [и др.] // Applied thermal engineering. – 2018. – Т. 145. – С. 305-314.
90. Dodmani, A. Theoretical cutting edge radius radius on single crystal diamond tool : Conference: World Congress on Micro and Nano ManufacturingAt: North carolina,USA / A. Dodmani, S. Subbiah. – 2019. – № 76(5). – С. 43-51.
91. Fabrication, transport behaviors and green interrupted cutting performance of bio-inspired microstructure on Al₂O₃/TiC composite ceramic surface : Journal of Manufacturing Processes / X. Cui, Y. Li, J. Guo, Q. Guo. – № 75(7). – С. 203-218.
92. Fulemova, J. Influence of the cutting edge radius and the cutting edge preparation on tool life and cutting forces at inserts with wiper geometry / J. Fulemova, Z. Janda // Procedia Engineering. – 2014. – Т. 69. – С. 567-573.
93. Gorshkov, I.V. Influence of structural parameters of cutting ceramics on quality of processing of machine slideways of metal-cutting equipment in selective formation of instrumentation / I.V. Gorshkov, **М.А. Попов** // Key Engineering Materials. – 2020. – Т. 854. – С. 64-73.

94. Influence of cutting edge radius of coated tool in orthogonal cutting of alloy steel | AIP conference proceedings | AIP publishing : AIP Conference Proceedings / J. Rech, Y.C. Yen, H. Hamdi [и др.]. – 2004. – № 712. – С. 1402-1407.
95. Influence of cutting edge radius on the wear resistance of PM-HSS milling inserts : Materials Science / J. Rech, Y.-C. Yen, M.-J. Schaff, H. Hamdi. – 2005. – № 259. – С. 1168-1176.
96. Influence of the cutting edge preparation method on characteristics and performance of PVD coated carbide inserts in hard turning | Request PDF : Surface and Coatings Technology / B. Denkena, J. Köhler, B. Breidenstein, A.M. Абрао. – 2014. – № 254. – С. 447-454.
97. Jayswal, S.C. Modeling and simulation of magnetic abrasive finishing process : The International Journal of Advanced Manufacturing Technology / S.C. Jayswal, V.K. Jain, P.M. Dixit. – 2005. – № 26(5). – С. 477-490.
98. Kim, J. Simulation for the prediction of surface-accuracy in magnetic abrasive machining : Journal of Materials Processing Technology / J. Kim, M. Choi. – 1995. – № 53. – С. 630-642.
99. Kishawy, H.A. Effect of cutting edge radius when milling hardened steels: a finite element analysis and surface integrity investigation : Machining Science and Technology / H.A. Kishawy, A. Hosseini, M. Imad. – 2022. – № 26(1). – С. 1-24.
100. Liu, C.R. Variables governing patterns of mechanical residual stress in a machined surface / C.R. Liu, M.M. Barash // Journal of Engineering for Industry. – 1982. – Т. 104. – № 3. – С. 257-264.
101. Maiboroda, V.S. Internal friction characteristics of mixtures of magnetic abrasive powders in magnetic fields : Powder Metallurgy and Metal Ceramics / V.S. Maiboroda. – 2000. – № 39(3). – С. 163-167.
102. Maksarov, V.V. Improvement of Magnetic-abrasive finishing of nonuniform products made of high-speed steel in digital conditions : Key Engineering Materials / V.V. Maksarov, A.I. Keksin, I.A. Filipenko. – 2020. – № 836. – С. 71-77.
103. Maksarov, V.V. Influence of magnetic-abrasive machining parameters on ceramic cutting tools for technological quality assurance of precision products from cold-

resistant steels / V.V. Maksarov, **M.A. Popov**, V.P. Zaharova // Chernye Metally. – 2023. – № 1. – С. 67-73.

104. Martin, R.N. Erkenntnisse uber den werkstoffabtragsvorgang beim lappen : Fachher. Oberflachentechn / R.N. Martin. – 1972. – № 10(6). – С. 197-202.

105. Paswan, S.K. Analysis of finishing performance in rotating magnetorheological honing process with the effect of particles motion : ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E Journal of Process Mechanical Engineering 1989-1996 / S.K. Paswan, A.K. Singh. – 2021. – № 235(4).

106. Polishing characteristics of transparent polycrystalline YAG ceramics using magnetic field-assisted finishing : Journal of Micro and Nano-Manufacturing / D. Ross, Y. Wang, H. Ramadhan, H. Yamaguchi. – 2016. – № 4(4). – С. 41-50.

107. Priarone, P.C. Effects of cutting angle, edge preparation, and nano-structured coating on milling performance of a gamma titanium aluminide | Request PDF : Journal of Materials Processing Technology / P.C. Priarone, С. Риццуги, L. Settineri. – № 212(12). – С. 2619-2628.

108. Sadat, A.B. Residual stresses in turned AISI 4340 steel | SpringerLink : Experimental Mechanics / A.B. Sadat, J.A. Bailey. – 1987. – № 27. – С. 80-85.

109. Singh, M. Theoretical investigations into magnetorheological finishing of external cylindrical surfaces for improved performance : ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science 1989-1996 / M. Singh, A.K. Singh. – № 234(24). – С. 1-18.

110. Spohner, M. A study of the properties of electrical insulation oils and of the components of natural oils : Acta Polytechnica / M. Spohner. – № 52(5). – С. 100-105.

111. Surface integrity characteristics and fatigue failure mechanism of carburized M50NiL steel : Hangkong Cailiao Xuebao/Journal of Aeronautical Materials / Y. Lou, C. Li, X. Li, X. Xie. – 2017. – № 37(6). – С. 25-33.

112. Yamaguchi, H. Development of a new precision internal machining process using an alternating magnetic field : Precision Engineering / H. Yamaguchi, M. Takenaga. – 2003. – № 21(7). – С. 51-58.

113. Yin, S. A comparative study: Polishing characteristics and its mechanisms of three vibration modes in vibration-assisted magnetic abrasive polishing : International Journal of Machine Tools and Manufacture / S. Yin. – 2004. – № 44(4). – С. 383-390.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Вспомогательные таблицы для построения регрессионных моделей

Таблица А.1 – Критические значения t -критерия

Число степеней свободы f	Уровни значимости α			Число степеней свободы f	Уровни значимости α		
	0,1	0,05	0,01		0,1	0,05	0,01
1	6,31	12,7	63,66	16	1,75	2,12	2,92
2	2,92	4,30	9,93	17	1,74	2,11	2,90
3	2,35	3,18	5,84	18	1,73	2,10	2,88
4	2,13	2,78	4,60	19	1,73	2,09	2,86
5	2,02	2,57	4,03	20	1,73	2,08	2,85
6	1,94	2,45	3,71	21	1,72	2,08	2,83
7	1,90	2,37	3,50	22	1,71	2,07	2,82
8	1,86	2,31	3,36	23	1,71	2,07	2,81
9	1,83	2,26	3,25	24	1,71	2,06	2,80
10	1,81	2,23	3,17	25	1,71	2,06	2,79
11	1,80	2,20	3,11	26	1,71	2,06	2,78
12	1,78	2,18	3,06	27	1,70	2,05	2,77
13	1,77	2,16	3,01	28	1,70	2,05	2,76
14	1,76	2,15	2,98	29	1,70	2,05	2,76
15	1,75	2,13	2,95	30	1,70	2,04	2,75
				∞	1,64	1,96	2,58

Таблица А.2 – Значения критерия Фишера

Число степеней свободы в знаменателе	Число степеней свободы в числителе																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	20	24	30	50	100	∞
1	161 4052	200 4999	216 5403	225 5625	230 5764	234 5859	237 5928	239 5981	241 6022	242 6056	243 6082	244 6106	245 6142	246 6169	248 6208	249 6234	250 6258	252 6303	253 6334	254 6366
2	18,51 98,49	19,00 99,01	19,16 99,17	19,25 99,25	19,30 99,30	19,33 99,33	19,36 99,94	19,37 99,36	19,38 99,38	19,39 99,40	19,40 99,41	19,41 99,42	19,42 99,43	19,43 99,44	19,44 99,55	19,45 99,48	19,46 99,48	19,47 99,48	19,49 99,48	19,50 99,50
3	10,13 34,12	9,55 30,81	9,28 29,46	9,12 28,71	9,01 28,24	8,94 27,91	8,88 27,67	8,84 27,29	8,81 27,34	8,87 27,23	8,76 27,13	8,74 27,05	8,71 26,92	8,69 26,83	8,66 26,69	8,62 26,50	8,62 26,50	8,58 26,27	8,56 26,23	8,53 26,12
4	7,71 21,20	6,59 18,00	6,59 16,69	6,39 15,98	6,26 15,52	6,16 15,51	6,09 14,98	6,04 14,80	6,00 14,66	5,96 14,54	5,93 14,45	5,91 14,37	5,87 14,24	5,84 14,15	5,80 14,02	5,77 13,93	5,74 13,83	5,70 13,69	5,66 13,57	5,63 13,46
5	6,61 16,26	5,57 13,27	5,41 12,06	5,19 11,39	5,05 10,97	4,95 10,67	4,88 10,45	4,82 10,27	4,78 10,15	4,74 10,05	4,70 9,96	4,68 9,89	4,64 9,70	4,60 9,68	4,56 9,55	4,53 9,47	4,50 9,38	4,46 9,24	4,40 9,13	4,36 9,02
6	5,99 13,74	5,14 10,92	4,76 9,98	4,53 9,15	4,39 8,75	4,28 8,47	4,21 8,26	4,15 8,10	4,10 7,98	4,06 7,87	4,03 7,79	4,00 7,72	3,96 7,60	3,92 7,52	3,87 7,39	3,84 7,31	3,81 7,23	3,75 7,09	3,71 6,99	3,67 6,88
7	5,59 12,26	4,74 9,55	4,35 8,45	4,12 7,85	3,98 7,46	3,87 7,19	3,79 7,00	3,73 6,84	3,68 6,71	3,63 6,62	3,60 6,54	3,57 6,47	3,52 6,35	3,49 6,27	3,44 6,15	3,41 6,07	3,38 5,98	3,32 5,85	3,28 5,75	3,23 5,65
8	5,32 11,26	4,46 8,65	4,07 7,59	3,84 7,01	3,69 6,63	3,58 6,37	3,50 6,19	3,44 6,03	3,39 5,91	3,34 5,82	3,31 5,74	3,28 5,67	3,23 6,65	3,20 5,48	3,15 5,36	3,12 5,28	3,08 5,20	3,03 5,06	2,98 4,96	2,93 4,86
9	5,12 10,56	4,26 8,02	3,86 6,99	3,63 6,42	3,48 6,06	3,37 5,80	3,29 5,62	3,23 5,47	3,18 5,35	3,13 5,26	3,10 5,18	3,07 5,11	3,02 5,00	2,98 4,98	2,93 4,80	2,90 4,73	2,86 4,64	2,80 4,51	2,76 4,41	2,71 4,31
10	4,96 10,04	4,10 7,56	3,71 6,55	3,48 5,99	3,33 5,64	3,22 5,39	3,14 5,21	3,07 5,06	3,02 4,95	2,97 4,85	2,94 4,78	2,91 4,71	2,86 4,60	2,82 4,52	2,77 4,41	2,74 4,33	2,70 4,25	2,64 4,12	2,59 4,01	2,54 3,91
15	5,54 8,68	3,68 6,36	3,29 5,42	3,06 4,89	2,90 4,56	2,79 4,32	2,70 4,14	2,64 4,00	2,59 3,89	2,55 3,80	2,51 3,73	2,48 3,67	2,43 3,56	2,39 3,48	2,33 3,36	2,29 3,29	2,25 3,20	2,18 3,07	2,12 2,97	2,07 2,87
20	4,35 8,1	3,49 5,85	3,10 4,94	2,87 4,43	2,71 4,10	2,60 3,87	2,52 3,71	2,45 3,56	2,40 3,45	2,35 3,37	2,31 3,30	2,29 3,23	2,23 3,13	2,18 3,05	2,12 2,94	2,08 2,86	2,04 2,77	1,96 2,63	1,90 2,53	1,84 2,42
30	4,16 7,56	3,32 5,39	2,92 4,51	2,69 4,02	2,53 3,70	2,42 3,47	2,34 3,30	2,27 3,17	2,21 3,06	2,16 2,98	2,12 2,90	2,09 2,84	2,04 2,27	1,99 2,66	1,93 2,55	1,89 2,47	1,84 2,38	1,76 2,24	1,69 2,13	1,62 2,01
50	4,03 7,17	3,18 3,06	2,79 4,20	2,56 3,72	2,40 3,41	2,29 3,18	2,20 3,02	2,13 2,88	2,07 2,78	2,02 2,70	1,98 2,62	1,95 2,56	1,90 2,46	1,85 2,39	1,78 2,26	1,74 2,18	1,69 2,10	1,60 1,94	1,52 1,82	1,44 1,68
100	3,94 6,90 3,84 6,64	3,09 4,82 2,99 4,60	2,70 3,98 2,60 3,78	2,46 3,51 2,37 3,32	2,30 3,20 2,21 3,02	2,19 2,99 2,09 2,80	2,10 2,82 2,01 2,64	2,08 2,69 1,94 2,51	1,97 2,59 1,88 2,41	1,92 2,51 1,83 2,32	1,88 2,43 1,79 2,24	1,85 2,36 1,75 2,18	1,79 2,26 1,69 2,07	1,75 2,19 1,64 1,99	1,68 2,06 1,57 1,87	1,63 1,98 1,52 1,79	1,57 1,89 1,46 1,79	1,48 1,73 1,35 1,36	1,39 1,59 1,24 1,36	1,29 1,43 1,00 1,00

Таблица А3 – Вспомогательные константы для составления рототабельного плана эксперимента

Номер плана	k	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}
1	2	1,00000	0,5000	0,12500	0,25000	0,12500	0,21875	1,00000	0,35355	0,50000	0,58630
2		0,50000	0,25000	0,12500	0,25000	0,12500	0,09375	0,70711	0,35355	0,50000	0,46771
3		0,33333	0,16667	0,12500	0,25000	0,12500	0,05208	0,57735	0,35355	0,50000	0,42081
4		0,25000	0,12500	0,12500	0,25000	0,12500	0,03125	0,50000	0,35355	0,50000	0,39528
5		0,20000	0,10000	0,12500	0,25000	0,12500	0,01875	0,44721	0,35355	0,50000	0,37914
6		0,12500	0,06250	0,12500	0,25000	0,12500	0	0,35355	0,35355	0,50000	0,35355
7	3	0,98835	0,33744	0,07322	0,12500	0,06250	0,10271	0,99416	0,27059	0,35355	0,40646
8		0,49707	0,16971	0,07322	0,12500	0,06250	0,04544	0,70503	0,27059	0,35355	0,32854
9		0,33201	0,11335	0,07322	0,12500	0,06250	0,02620	0,57620	0,27059	0,35355	0,29783
10		0,24927	0,08511	0,07322	0,12500	0,06250	0,01656	0,49927	0,27059	0,35355	0,28118
11		0,16635	0,05680	0,07322	0,12500	0,06250	0,00689	0,40786	0,27059	0,35355	0,26342
12		0,11096	0,03787	0,07322	0,12500	0,06250	0,00044	0,33311	0,27059	0,35355	0,25091
13	4	0,99998	0,24999	0,04167	0,06250	0,03125	0,05729	0,99999	0,20413	0,25000	0,29756
14		0,50000	0,12500	0,04167	0,06250	0,03125	0,02604	0,70711	0,20413	0,25000	0,23935
15		0,33327	0,08332	0,04167	0,06250	0,03125	0,01562	0,57730	0,20413	0,25000	0,21649
16		0,25000	0,06250	0,04167	0,06250	0,03125	0,01042	0,50000	0,20413	0,25000	0,20413
17		0,14287	0,03571	0,04167	0,06250	0,03125	0,00372	0,37798	0,20413	0,25000	0,18702
18		0,08333	0,02083	0,04167	0,06250	0,03125	0	0,28867	0,20413	0,25000	0,17678

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Технические характеристики приборов

Таблица В.1 – Технические характеристики прибора «Surftest» (Япония)

Модель	SJ-210 P
№	178930 – 2 D
Назначение	Измерение шероховатости поверхностей
Диапазон измерений	
По оси Z	350 мкм
По оси X	12,5 мкм
Блок привода	
Скорость измерения	0,25 мм/сек; 0,5 мм/сек
Скорость возврата	0,8 мм/сек
Длина кабеля	1 м
Масса	190 г
Датчик	
Тип	Стандартный (178-395)
Метод измерений	Индуктивный метод
Диапазон измерений	350 мкм
Щуп	Алмазный наконечник
Радиус	2 мкм
Радиус опоры	40 мм
Измерительное усилие	0,75 мН
Масса	18 г
Дисплейный блок	
Профили	Исходный профиль (P), Профиль шероховатости (R), DIN 4776
Параметры	Ra, Ry, Rz, Rt, Rp, Sm, S, Pc, R3z, mr, A1, A2, Rq, Rk, Rpk, Mr 1, Mr 2, Vo
Аналитические графики	–
Стандарты шероховатости	DIN, ISO, ANSI, JIS
Длина оценки (L)	0,25 мм, 0,8 мм, 2,5 мм
Отсечка шага	lc: 0,25 мм, 0,8 мм, 2,5 мм ls: 2,5 мкм, 8 мкм
Число базовых длин	x 1, x 3, x 5, x L
Фильтр	2CR – 75%, 2CR – 75% (фазокорректированный фильтр). Гаусов фильтр
Вертикальное увеличение изображения на дисплее	–

Таблица В.2 – Технические характеристики лабораторных весов *ВЛТЭ-310*

Характеристика	Значение
Максимальная нагрузка, г	310
Минимальная нагрузка, г	0,02
Цена деления, г	0,001
Размер чашки, мм	116
Класс точности	Высокий II (согласно ГУ)
Калибровочные гири	200 г F2
Ветрозащита	да
Индикатор	жидкокристаллический с подсветкой
Питание	сетевой адаптер AC/DC
Габаритные размеры, мм	260×190×125
Вес, кг	1,7
Диапазон рабочих температур	+10°C ... +35°C
Выборка массы тары	во всем диапазоне взвешивания

Таблица В.3 – Технические характеристики прибора *ПМТ-3*

Характеристика	Значение
Диапазон нагрузки, Н	0,0196...4,9
Диапазон нагрузки, КГС	0,002...0,5
Увеличение микроскопа, крат	130, 500, 800
Цена деления шкал координатного перемещения, мм	0,01
Пределы координатного перемещения, мм	0...10
Размеры Ш x Д x В, мм	270x290x470
Масса, кг, не более	22

Таблица В.4 – Технические характеристики микроскопа *MarVision MM 320*

Диапазон измерений X/Y, мм	100/100	200/100	250/170	400/250
Перемещение по оси Z, мм	200/400			
Размеры измерительного стола, мм	270x210	370x210	420x280	600x480
Макс. нагрузка стола, кг	20			
Измерительная система:	встроенная инкрементная шкала			
- Шаг дискретности, мм	0,001			
- Предел доп. погр. E ₁ X/Y, мкм	1,9+(L/100) L, мм		3,9+(L/100) L, мм	
- Предел доп. погр. E ₂ X/Y, мкм	2,9+(L/100) L, мм		4,9+(L/100) L, мм	
Рабочее расстояние микроскопа, мм	85			
Макс. высота контролируемой детали, мм	120/320		90/290	
Освещение	Светодиодный светильник, проходящий и отраженный свет с регулируемой яркостью			
Размеры В x Ш x Г, мм	700x480 x430	700x650 x550	700x700 x600	800x1000 x900

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Патент на устройство крепления режущих пластин

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 212068

УСТРОЙСТВО ДЛЯ КРЕПЛЕНИЯ РЕЖУЩИХ
ПЛАСТИН

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Максаров Вячеслав Викторович (RU), Халимоненко Алексей Дмитриевич (RU), Кексин Александр Игоревич (RU), Попов Максим Алексеевич (RU)*

Заявка № 2022103148

Приоритет полезной модели 09 февраля 2022 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 05 июля 2022 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 09 февраля 2032 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11)**212 068**⁽¹³⁾ **U1**

(51) МПК
B23Q 3/06 (2006.01)
B23P 15/28 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B23Q 3/06 (2022.05)

(21)(22) Заявка: 2022103148, 09.02.2022

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
09.02.2022

Дата регистрации:
05.07.2022

Приоритет(ы):
 (22) Дата подачи заявки: 09.02.2022

(45) Опубликовано: 05.07.2022 Бюл. № 19

Адрес для переписки:
 190106, Санкт-Петербург, 21 линия, В.О., 2,
 ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский ГУ",
 Патентно-лицензионный отдел

(72) Автор(ы):

Максаров Вячеслав Викторович (RU),
 Халимоненко Алексей Дмитриевич (RU),
 Кексин Александр Игоревич (RU),
 Попов Максим Алексеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное
 образовательное учреждение высшего
 образования "Санкт-Петербургский горный
 университет" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
 о поиске: RU 2111092 C1, 20.05.1998. RU
 2240912 C2, 27.11.2004. RU 2066600 C1,
 20.09.1996. RU 2583565 C1, 10.05.2016. RU
 2469819 C2, 20.12.2012. RU 2687623 C2,
 15.05.2019. US 3847555 A1, 12.11.1974. US 5667343
 A1, 16.09.1997.

RU 212068 U1

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ КРЕПЛЕНИЯ РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН

(57) Реферат:

Полезная модель предназначена для крепления режущих пластин различных типоразмеров и конфигураций, в том числе для использования в установках для магнитно-абразивной чистовой обработки деталей в машиностроении. Устройство для крепления режущих пластин содержит корпус и кассеты, несущие режущие пластины. В верхней части корпуса закреплен подвижный держатель, а в

нижней- держатель пеналя. Между подвижным зажимом и пеналом установлен клиновидный элемент, поверх которого установлена кассета. Режущая пластина крепится между подвижным держателем и кассетой. Техническим результатом является повышение эффективности производственного процесса и обеспечение требуемого качества поверхностей режущих пластин в процессе их обработки. 3 ил.

RU 212068 U1

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Акты о промышленном внедрении результатов исследования

Утверждаю

Первый заместитель генерального
директора АО ВО «Электроаппарат»
А.Н. Грицаев

Дата « 12 » 12



АКТ (СПРАВКА)

о внедрении результатов
кандидатской диссертации

Попова Максима Алексеевича

по научной специальности 2.5.6 Технология машиностроения

Комиссия (специальная) в составе:

Председатель комиссии:

Первый заместитель генерального директора Алексей Николаевич Грицаев;

Члены комиссии:

Главный конструктор Андрей Леонидович Карпов;

Главный технолог Валерий Николаевич Григуть;

составили настоящий акт (справку) о том, что результаты диссертации на тему «Технологическое обеспечение качества поверхности прецизионных изделий из хладостойких сталей на основе магнитно-абразивной обработки режущего инструмента», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в производственном процессе АО ВО «Электроаппарат» при разработке технологии обработки прецизионных поверхностей деталей элегазовых трансформаторов в виде:

– использования в технологическом процессе обработки изделий режущего инструмента с повышенными эксплуатационными характеристиками, достигнутыми в результате его предварительной подготовки методом магнитно-абразивной обработки;

– оптимизации технологических карт обработки высокоточных изделий посредством упразднения операции шлифования, которое стало возможно за счет обеспечения требуемых качественных характеристик изделий на этапе чистового точения при помощи предварительно подготовленного режущего инструмента;

- методики расчета варьируемых параметров магнитно-абразивной обработки, обеспечивающей формирование оптимальной геометрии и качественных характеристик режущего инструмента;
- рекомендации по технологическому обеспечению качества поверхностей изделий за счет предварительной подготовки режущего инструмента методом магнитно-абразивной обработки.

Использование указанных результатов позволяет:

- повысить качество прецизионных поверхностей изделий в процессе их механической обработки;
- увеличить ресурс и износостойкость режущего инструмента, применяемого в операциях чистового точения;
- сократить количество технологических операций, упразднив финишный процесс шлифования, за счет обеспечения требуемого качества изделия на этапе чистового точения;
- повысить эффективность процесса обработки изделий и сократить расходы на производство за счет уменьшения количества операций в технологическом процессе.

Председатель комиссии

Первый заместитель генерального директора

Члены комиссии:

Главный конструктор

Главный технолог

А.Н. Грицаев

А.Л. Карпов

В.Н. Григутъ

Утверждаю

И.о. Генерального директора
С.Б. Каренин

«16» марта 2023 г.



АКТ
о внедрении результатов
кандидатской диссертации
Попова Максима Алексеевича
по научной специальности 2.5.6 Технология машиностроения

Комиссия (специальная) в составе:

Председатель: главный инженер, **Виллерман Павел Манивальдович;**

Члены комиссии:

Заместитель генерального директора по коммерческой деятельности, **Кучер Сергей Викторович;**

Заместитель генерального директора по производству и ГОЗ, **Зараковский Владимир Константинович.**

составили настоящий акт (справку) о том, что результаты диссертации на тему «Технологическое обеспечение качества поверхности прецизионных изделий из хладостойких сталей на основе магнитно-абразивной обработки режущего инструмента», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в производственном процессе АО «Завод «Энергия» при разработке технологии обработки валов из широкой номенклатуры материалов в виде:

- использования в технологическом процессе обработки изделий режущего инструмента с повышенными эксплуатационными характеристиками, достигнутыми в результате его предварительной подготовки методом магнитно-абразивной обработки;
- оптимизации технологических карт обработки высокоточных изделий посредством упразднения операции шлифования, которое стало возможно за счет обеспечения требуемых качественных характеристик изделий на этапе чистового точения при помощи предварительно подготовленного режущего инструмента;

- методики расчета варьируемых параметров магнитно-абразивной обработки, обеспечивающей формирование оптимальной геометрии и качественных характеристик режущего инструмента;
- рекомендации по технологическому обеспечению качества поверхностей изделий за счет предварительной подготовки режущего инструмента методом магнитно-абразивной обработки.

Использование указанных результатов позволяет:

- повысить качество прецизионных поверхностей изделий в процессе их механической обработки;
- увеличить ресурс и износостойкость режущего инструмента, применяемого в операциях чистового точения;
- сократить количество технологических операций, упразднив финишный процесс шлифования, за счет обеспечения требуемого качества изделия на этапе чистового точения;
- повысить эффективность процесса обработки изделий и сократить расходы на производство за счет уменьшения количества операций в технологическом процессе.

Председатель комиссии

Главный инженер

Виллерман П.М.

Члены комиссии:

Заместитель генерального директора
по коммерческой деятельности

Кучер С.В.

Заместитель генерального директора
по производству и ГОЗ

Зараковский В.К.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Акты внедрения результатов диссертации в учебный процесс

Утверждаю

Проректор по образовательной
деятельности федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный
университет»



к.т.н., доц. Д.Г. Петраков

Дата « 05 » 05 2023 г.

АКТ

о внедрении результатов
кандидатской диссертации

Попова Максима Алексеевича

соискателя ученой степени

по научной специальности 2.5.6. Технология машиностроения

Комиссия в составе:

Председатель: декан механико-машиностроительного факультета Максаров В.В.;

Члены комиссии: заведующий кафедры машиностроения – Жуков И.А.
доцент кафедры машиностроения – Халимоненко А.Д.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Технологическое обеспечение качества поверхности прецизионных изделий из хладостойких сталей на основе магнитно-абразивной обработки режущего инструмента», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в учебный процесс федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» при разработке учебных пособий для проведения практических занятий студентов направления подготовки 15.03.01 «Машиностроение», направленности (профиля) «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств».

В ходе практических занятий студенты знакомятся с методом магнитно-абразивной обработки, приобретают навыки работы на устройстве, базирующемся на фрезерном станке с ЧПУ Emco Concept 250, изучают способ предварительной подготовки режущего инструмента, в который входит формирование радиуса режущей кромки в диапазоне от 20 до 40 мкм и обеспечение шероховатости рабочих поверхностей инструмента Ra до 0,1 мкм, что в свою очередь уменьшает время приработки инструмента и увеличивает его износостойкость в 2,7 раза, а также учатся определять рациональные параметры обработки.

Председатель комиссии

Декан
механико-машиностроительного
факультета



Максаров В.В.

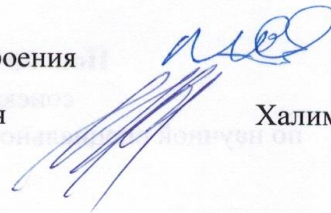
Члены комиссии:

Заведующий кафедры машиностроения



Жуков И.А.

Доцент кафедры машиностроения



Халимоненко А.Д.