

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

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2023

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Максаров Вячеслав Викторович

Официальные оппоненты:

Ямников Александр Сергеевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тулский государственный университет», кафедра технологии машиностроения, профессор;

Помпеев Кирилл Павлович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», факультет «Системы управления и робототехники», доцент.

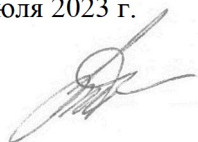
Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской Академии наук, г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **21 сентября 2023 г. в 12:00** на заседании диссертационного совета ГУ.9 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 21 июля 2023 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЕФИМОВ
Александр Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Hitano, 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-аб-

разивной обработки, участвующего в обработке высокотвердых изделий, для замены трудоемкого технологического процесса шлифования прецизионных поверхностей хладостойких сталей, что является актуальной технологической задачей, требующей своего решения

Содержание диссертации **соответствует паспорту научной специальности 2.5.6** Технология машиностроения по п. 4. «Совершенствование существующих и разработка новых методов обработки и сборки с целью повышения качества изделий машиностроения и снижения себестоимости их выпуска» и п.7. «Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин».

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, зависимо-

сти 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) и АО «Завод «Энергия» (Акт о внедрении от 16.03.2023 г., утвержден исполняющим обязанности генерального директора С.Б. Карениным), 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» Горного университета (Акт о внедрении от 05.05.2023 г., утвержден проректором по образовательной деятельности Д.Г. Петраковым).

Методология и методы исследования. 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 использованием 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 съем 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. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 10 печатных работах, 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 (далее – перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен один патент.

Структура работы. 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, идея работы, научная ценность и задачи исследования.

В первой главе приведен обзор по вопросу эксплуатации изделий из хладостойкой стали, выявлены основные дефекты и причины

их преждевременного выхода из строя, а также рассмотрены современные методы обработки деталей из хладостойких сталей с использованием предварительно подготовленного инструмента.

На основе проведенного анализа обоснован выбор объекта и предмета исследования, сформирована цель и поставлены задачи.

Во второй главе представлены теоретические и экспериментальные исследования по разработке способа магнитно-абразивной обработки керамических режущих пластин, обеспечивающего формирование радиуса скругления режущей кромки в заданном диапазоне значений и способствующего снижению шероховатости передней и задней поверхностей инструмента.

В конце второй главы сформулированы выводы и даны рекомендации по использованию полученных результатов.

В третьей главе на основании разработанного технологического способа предварительной подготовки керамических режущих пластин методом магнитно-абразивной обработки проводились экспериментальные исследования по влиянию варьируемых параметров процесса на формирование качественных характеристик инструмента. Проведен анализ эффективности магнитно-абразивной обработки.

В четвертой главе описаны экспериментальные исследования обработки изделий из хладостойкой стали предварительно подготовленным инструментом магнитно-абразивным методом. Исследования проводились на стали 40Х2Н2МА после термической обработки.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

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.

В результате исследований по предварительной подготовке инструмента на основе режущей керамики марки ВОК-60, разработан способ магнитно-абразивной обработки режущей кромки и рабочих поверхностей сменных многогранных пластин, который заключался в определении: диапазона технологических параметров обработки, состава ферроабразивного инструмента, сочетании рабочих движений и схемы обработки (рисунок 1).

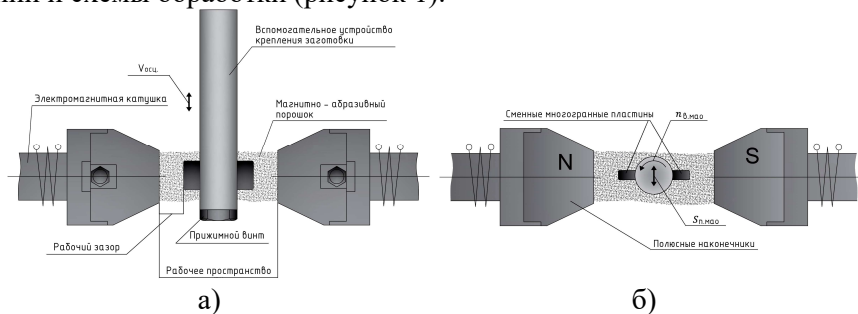


Рисунок 1 – Схема магнитно-абразивной обработки сменных многогранных пластин (а – вид сбоку, б – вид снизу),

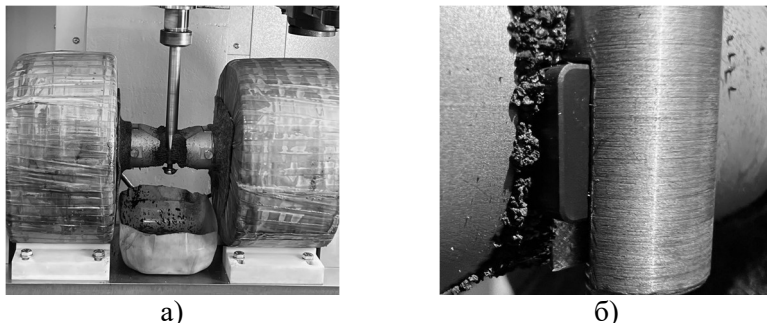
где: $n_{в.мао}$ – частота вращения, $S_{п.мао}$ – величина продольной подачи, $V_{осц.мао}$ – скорость осцилляции

На основании исследований установлено, что магнитно-абразивную обработку режущих кромок и рабочих поверхностей керамических режущих пластин следует проводить с применением композиционного магнитно-абразивного порошка «АЛВОПОЛ» (фракция $\Delta = 180 \dots 250$ мкм) и масляных водорастворимых смазочно-охлаждающих жидкостей на эмульсионной основе.

При определении диапазона технологических параметров магнитно-абразивной обработки, установлено, что значения параметров будут варьироваться: частота вращения вспомогательного приспособления с закрепленной керамической пластиной в диапазоне значений $n_{в.мао} = 100-600$ мин⁻¹; возвратно-поступательное движение вдоль полюсных наконечников в диапазоне значений $S_{п.мао} = 25-$

225 мм/мин; время обработки в пределах $t_{\text{мао}} = 4-12$ мин; величина магнитной индукции в диапазоне $B = 0,35-0,95$ Тл.

Разработанный способ реализован на установке для магнитно-абразивной обработки на базе фрезерного станка с ЧПУ *Emco Concept Mill 250* (рисунок 2).



а) Рисунок 2 – Магнитно-абразивная обработка, где:
а) установка на станке с ЧПУ; б) процесс обработки изделия

Рассматривая предлагаемый способ, стоит отметить, что эффект скольжения абразивных частиц о поверхность обрабатываемого материала гарантирует бездефектность обработки. Скольжение частиц обеспечивает микрорезание и формирует качество обработанной поверхности, сглаживая микронеровности и исключая микроудар абразивных частиц о поверхность.

Предложенный способ позволяет увеличить ресурс режущего инструмента за счет снижения времени приработки, нивелирования дефектного слоя и следов предыдущей обработки, снижения шероховатости режущих поверхностей до $R_a = 0,1$ мкм и формирования радиуса 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.

На основании разработанного технологического способа предварительной подготовки керамических режущих пластин методом магнитно-абразивной обработки проводились экспериментальные исследования по влиянию варьируемых параметров на формирование качественных характеристик инструмента: радиуса скругления режущей кромки ρ и шероховатости передней и задней поверхностей R_a . Параллельно проводился анализ эффективности магнитно-абразивной обработки, который оценивался по удельному съему материала с обрабатываемой поверхности q и анализу топографии.

В ходе исследования установлено, что применение разработанной схемы магнитно-абразивной обработки позволяет обеспечить шероховатость рабочих поверхностей $R_a = 0,1$ мкм, радиус скругления режущей кромки ρ до 40 мкм, а также удельный съем материала с единицы площади $q = 0,0745$ г/см².

На основании полиномиальных функций (рисунок 3), а также статистического анализа результатов экспериментов установлено, что на шероховатость поверхности керамических режущих пластин наибольшее влияние оказывает частота вращения $n_{в.мао}$, второстепенную позицию занимает величина продольной подачи $S_{п.мао}$ и затем индукция B ; на скругление режущей кромки и удельный съем материала наибольшее влияние оказывает индукция B и время обработки $t_{мао}$, второстепенную позицию занимает частота вращения $n_{в.мао}$.

По результатам проведения экспериментальных исследований выполнена статистическая обработка полученных данных, которая позволила получить регрессионные математические зависимости, учитывающие варьируемые технологические параметры магнитно-абразивной обработки и позволяющие получить значения шероховатости и радиуса скругления режущей кромки:

1. Шероховатость рабочих поверхностей R_a , мкм (1):

$$R_a = 0,485 - 1,136B + 1,11B^2 + 0,457 \cdot 10^{-3}n_{в.мао} - 0,048 \cdot 10^{-2}Bn_{в.мао} - 0,198 \cdot 10^{-5}n_{в.мао}^2 - 0,147 \cdot 10^{-2}S_{п.мао} + 0,213 \cdot 10^{-2}BS_{п.мао} + 0,304 \cdot 10^{-5}n_{в.мао}S_{п.мао} - 8 \cdot 10^{-7}S_{п.мао}^2 +$$

$$0,04t_{\text{мао}} - 0,05Bt_{\text{мао}} + 0,96 \cdot 10^{-4}n_{\text{в.мао}}t_{\text{мао}} - 0,18 \cdot 10^{-3}S_{\text{п.мао}}t_{\text{мао}} - 0,75 \cdot 10^{-3}t_{\text{мао}}^2.$$

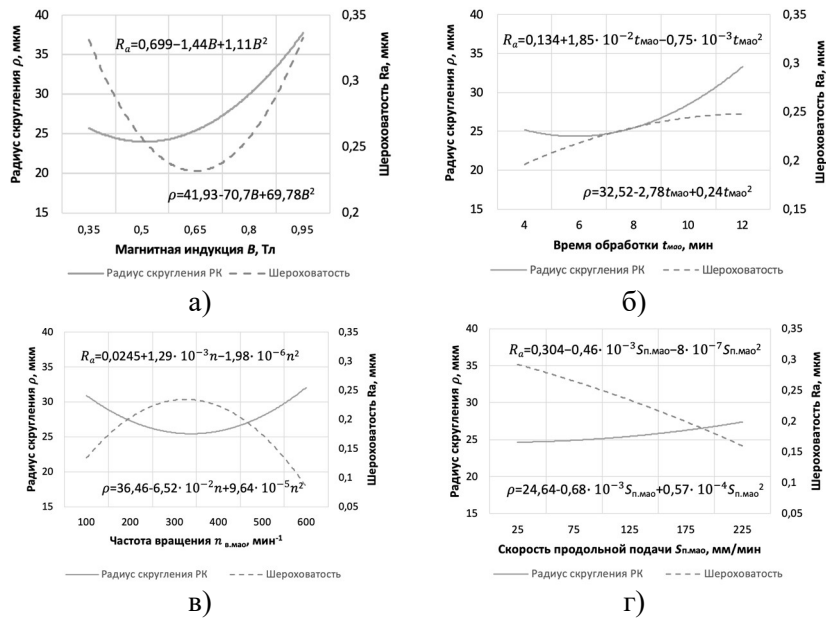


Рисунок 3 – Обобщающие полиномиальные графические модели влияния технологических факторов на шероховатость поверхности и радиус скругления режущей кромки керамического инструмента марки ВОК-60: а) магнитная индукция B ; б) время обработки $t_{\text{мао}}$; в) частота вращения $n_{\text{в.мао}}$; г) величина продольной подачи $S_{\text{п.мао}}$

2. Радиус скругления режущей кромки ρ , мкм (2):

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

Производительность процесса магнитно-абразивной обработки оценивалась удельным съемом материала с единицы площади q .

По результатам исследования проведена статистическая обработка данных и получена регрессионная математическая зависимость (3):

$$q = 0,159 - 0,344B + 0,175B^2 - 6,21 \cdot 10^{-5}n_{\text{в.мао}} + 9,01 \cdot 10^{-5}Bn_{\text{в.мао}} + 6,912 \cdot 10^{-8}n_{\text{в.мао}}^2 + 2,67 \cdot 10^{-4}S_{\text{п.мао}} - 5,87 \cdot 10^{-5}BS_{\text{п.мао}} - 1,71 \cdot 10^{-7}n_{\text{в.мао}}S_{\text{п.мао}} + 3,04 \cdot 10^{-7}S_{\text{п.мао}}^2 - 1,34 \cdot 10^{-2}t_{\text{мао}} + 1,8 \cdot 10^{-2}Bt_{\text{мао}} + 4,28 \cdot 10^{-6}n_{\text{в.мао}}t_{\text{мао}} - 2,94 \cdot 10^{-5}S_{\text{п.мао}}t_{\text{мао}} + 3,85 \cdot 10^{-4}t_{\text{мао}}^2. \quad (3)$$

Таким образом, полученные результаты являются основой для подготовки режущего инструмента с применением способа магнитно-абразивной обработки перед его использованием в операция чистового точения хладостойких сталей.

3. Разработанный и реализованный на практике способ технологической обработки изделия с использованием 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.

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

В результате проведенных исследований была установлена нелинейная зависимость влияния радиуса 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 (рисунк 4).

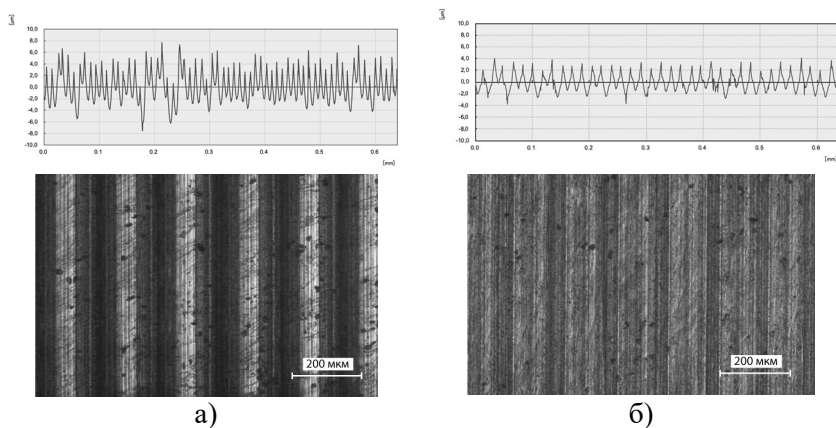


Рисунок 4 – Результаты обработки изделия из стали 40X2H2MA режущим инструментом, где: а) без предварительной подготовки; б) подготовленным магнитно-абразивным методом с $\rho = 25$ мкм

По итогам проведенных экспериментальных исследований даны следующие рекомендации по токарной обработке изделий из хладостойкой стали: скорость резания $V = 350$ м/мин, глубина $t = 0,05$ мм, подача $S = 0,1$ мм/об, радиус режущей кромки керамической пластины $\rho = 25$ мкм, который достигается при магнитно-абразивной обработке с технологическими параметрами: 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.

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 при операциях чистового точения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации разработан метод 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.

Основные научные результаты и практические рекомендации отражены в следующих выводах:

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 съём 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 съёма 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 съёма 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 $B = 0,35-0,95$ Тл, $t_{\text{мао}} = 4-12$ мин, $S_{\text{п.мао}} = 25-225$ мм/мин, $n_{\text{в.мао}} = 100-600$ 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 $R_a = 0,8$ 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

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

2. Максаров, В.В. Влияние радиуса округления режущей кромки на повышение качества поверхностного слоя детали / В.В. Максаров, И.А. Бригадов, **М.А. Попов** // Известия Тульского государственного университета. – 2021. – №9(872). – С.637-644.

3. Максаров, В.В. Исследование влияния радиуса режущей кромки на шероховатость поверхности детали / В.В. Максаров,

М.А. Попов, В.И. Болобов, В.Г. Куфаев // Металлообработка. – 2023. – №2 (122). – С. 31 – 42.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

4. 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. – Volume 854. – pp. 64–734.

5. 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, **М.А. Попов**, V.P. Zakharova // *Chernye Metally*, – 2023 (1), – pp. 67–73.

Патент:

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