

На правах рукописи

Максимов Дмитрий Дмитриевич



**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И
ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА
МАРКИ АМц**

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

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

Санкт-Петербург – 2024

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Максаров Вячеслав Викторович

Официальные оппоненты:

Петров Владимир Маркович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, кафедра технологии и производства артиллерийского вооружения, профессор;

Помпеев Кирилл Павлович

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

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **2 июля 2024 г. в 10:00** на заседании диссертационного совета ГУ.9 Санкт-Петербургского горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан **2 мая 2024 г.**

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЕФИМОВ
Александр Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Основные тенденции в экономическом развитии городов Российской Федерации задают необходимость формирования и реализации промышленных комплексов. Расширение промышленного производства влечет за собой повышение конкурентоспособности как отдельно взятых товаров и услуг, так и всего экономического потенциала страны.

Ограниченность промышленных территорий в черте города обуславливает необходимость оснащать промышленные комплексы более компактным, энергоемким, безопасным и бесшумным оборудованием. К такому оборудованию относят, например, трансформаторные подстанции, в трансформаторах которых в качестве изоляционного вещества применяется элегаз.

В настоящее время при производстве, например, элегазовых трансформаторов из алюминиевых сплавов, имеющих сложнопровильные поверхности, сталкиваются с проблемой получения равномерной шероховатости ($R_a \geq 0,8$ мкм) обработанной поверхности.

Предприятия не обладают современными технологиями по обеспечению качества сложнопровильных поверхностей изделий. Процесс достижения заданного качества изделия является трудоемким, занимающим значительное количество времени, так как обеспечение качества сложнопровильных поверхностей осуществляется ручным, либо полуавтоматизированным механическим воздействием. Процесс шлифования сложнопровильной поверхности до заданной шероховатости ($R_a \geq 0,8$ мкм) осуществляется несколькими рабочими – от станочника до сборщика, при этом продолжительность ручного шлифования (ошкуривания) занимает до 2х часов.

Степень разработанности темы исследования

Значительный вклад в изучение процесса магнитно-абразивной обработки внесли многие ученые, в том числе Акулович Л.М., Бабич В.И., Барон Ю.М., Жданович В.И., Иконников А.М., Приходько С.П., Сакулевич Ф.Ю., Скворчевский Н.Я., Татаркин Е.Ю., Хомич Н.С., Kim J.S., Prakash C., Singh P., Singh R. и другие.

Изучению природы процесса магнитно-абразивной обработки изделий, имеющих сложную пространственную форму, например зубчатых колес, свои труды посвятили исследователи Благодарная О.В., Сергеев Л.Е., Сенчуров Е.В., Шабуня В.В., Sharma V.K., Xie H.

Вопросам подбора магнитно-абразивных порошков с целью повышения производительности процесса магнитно-абразивной обработки посвящены труды Пантелеенко Ф.И., Петришина Г.В., Song W., Xu J.

Недостаточно изучено распределение магнитного поля между полюсными наконечниками, магнитами и сложнопрофильной поверхностью, не выявлены зависимости качества обработанной сложнопрофильной поверхности от технологических параметров обработки. Отсутствуют методики подбора технологических параметров.

На текущий момент практически отсутствует опыт цифровизации процесса магнитно-абразивной обработки, в том числе с целью предварительного моделирования процесса для подбора технологических параметров, конструктивных особенностей устройства, распределения магнитной индукции.

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

Объект исследования. Процесс магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава марки АМц.

Предмет исследования. Шероховатость сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава марки АМц.

Целью работы является технологическое обеспечение и повышение качества сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава марки АМц на финишной операции методом магнитно-абразивной обработки.

Идея исследования заключается в получении равномерной шероховатости сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава марки АМц посредством такого способа магнитно-абразивной

обработки, который обеспечивает эквидистантность рабочих поверхностей магнитов и обрабатываемой сложнопрофильной поверхности.

Задачи исследования.

Для достижения цели исследования необходимо выполнить следующие задачи:

1. Провести анализ особенностей окончательной обработки изделий из алюминиевых сплавов. Проанализировать текущее состояние и перспективы развития технологического обеспечения и повышения качества сложнопрофильных поверхностей посредством магнитно-абразивной обработки. Выявить основные особенности магнитно-абразивной обработки, определить основные технологические параметры процесса.

2. Разработать способ магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей и устройство для его осуществления, позволяющие обеспечить равномерное распределение магнитного поля в рабочем зазоре за счет сочетания рабочих движений, ориентации устройства относительно обрабатываемой поверхности и конструктивных особенностей устройства.

3. Экспериментально определить закономерности влияния технологических параметров магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей по предлагаемому способу на шероховатость поверхности и удельный съем материала.

4. Разработать математические модели зависимости шероховатости обработанной сложнопрофильной поверхности и удельного съема материала от технологических параметров магнитно-абразивной обработки.

5. Экспериментально определить влияние разработанного способа окончательной магнитно-абразивной обработки сложнопрофильной поверхности на производительность обработки и твердость по всему обработанному профилю. Провести сравнение производительности разработанного способа магнитно-абразивной обработки и шлифования сложнопрофильной поверхности.

6. Предложить практические рекомендации по выбору способа магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава АМц и подбору значений технологических

параметров магнитно-абразивной обработки, позволяющих обеспечить равномерную шероховатость поверхности.

Научная новизна:

1. Установлены математические зависимости шероховатости поверхности и удельного съема материала от технологических параметров магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава марки АМц.

2. Установлены закономерности изменения твердости сложнопрофильной поверхности из алюминиевого сплава марки АМц в результате магнитно-абразивной обработки.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Установлены закономерности влияния величины магнитной индукции, времени обработки, частоты вращения и амплитуды движения устройства в процессе магнитно-абразивной обработки на шероховатость обработанной сложнопрофильной поверхности из алюминиевого сплава марки АМц и удельный съем материала.

2. Разработан способ магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей и устройство для его осуществления (патент на изобретение RU 2787597 C1), включающий в себя схему магнитно-абразивной обработки сложнопрофильной поверхности, конструкцию устройство с постоянными магнитами, рабочие поверхности которых расположены параллельно касательным к обрабатываемой сложнопрофильной поверхности.

3. Определены технологические параметры магнитно-абразивной обработки сложнопрофильной поверхности из алюминиевого сплава АМц, позволяющие обеспечить равномерную шероховатость $R_a = 0,5$ мкм по всему обработанному профилю.

4. Установлено, что применение метода магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей позволяет заменить процесс шлифования финишным процессом магнитно-абразивной обработки, обеспечивающим достижение равномерной шероховатости по всему обработанному профилю $R_a = 0,5$ мкм.

5. Установлено, что применение метода магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей повышает производительность обработки в диапазоне частоты вращения заготовки

$n = 115 - 750 \text{ мин}^{-1}$ по сравнению со шлифованием в 1,4 раза, а также повышает твердость по всему обработанному профилю в 1,2 раза.

6. Результаты диссертационной работы прошли апробацию на промышленных предприятиях АО ВО «Электроаппарат», ООО «ИСО», а также отдельные 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 императрицы Екатерины II.

Методология и методы исследования. Решение поставленных в диссертации задач осуществлялось путем анализа и обобщения известных данных в области магнитно-абразивной обработки и природы данного процесса. Применены методы компьютерного моделирования с целью решения задач магнитостатики. При планировании эксперимента использован ротатбельный центральный композиционный план. Экспериментальные исследования проведены на токарном станке *JET GHB 1340A DRO*, фрезерном станке *Emco Concept Mill 250*. При анализе результатов экспериментов применены статистические методы обработки данных, лабораторное оборудование: измерительные весы *ВЛТЭ 310*, микроскоп инвертированный лабораторный *Leica DM ILM HC*, портативный твердомер *HT-1208*.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что способ магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей, включающий в себя схему ориентации постоянных магнитов, сочетание рабочих движений, и устройство для его осуществления, обеспечивают равномерную магнитную индукцию $B \geq 0,6 \text{ Тл}$ в рабочем зазоре и, как следствие, равномерную шероховатость сложнопрофильной поверхности $Ra = 0,5 \text{ мкм}$.

2. Разработанные полиномиальные математические модели, учитывающие параметры магнитно-абразивной обработки – магнитную индукцию, частоту вращения, время обработки, амплитуду осцилляции, позволяют оценить эффективность варьирования технологических параметров, получить прогнозируемые значения шероховатости сложнопрофильной поверхности и удельного съема материала.

3. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что способ магнитно-абразивной обработки сложнопрофильной поверхности и устройство для его осуществления позволяют повысить производительность обработки по сравнению со шлифованием в 1,4 раза в диапазоне частоты вращения заготовки $n = 115 - 750 \text{ мин}^{-1}$, а также повысить твердость сложнопрофильной поверхности по всему обработанному профилю в 1,2 раза.

Степень достоверности результатов исследования обеспечена необходимым объемом использованных методов математического планирования эксперимента, результатами промышленного опробования на производственных предприятиях АО ВО «Электроаппарат», ООО «ИСО», а также апробацией результатов исследований на всероссийских и международных конференциях и публикациями в рецензируемых журналах.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на научно-практических мероприятиях: VIII Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021», круглый стол молодых ученых (г. Санкт-Петербург, 2021 г.); Научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.), XIX Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.); IV Всероссийская научная конференция «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.); XVIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Высокие технологии в машиностроении» (г. Самара, 2021 г.), «Механика и машиностроение. Наука и практика: международная научно-практическая конференция» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.), «Россия молодая: XV Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием» (г. Кемерово, 2023 г.).

В полном объеме диссертация заслушана и одобрена на Междисциплинарном экспертном совете ученых Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II 29 марта 2024 г.

Способ магнитно-абразивной окончательной обработки сложнопрофильных поверхностей и устройство для его осуществления опробованы в производственном процессе промышленных предприятий.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертации; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования; разработке способа магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей и устройства для его осуществления; установлении закономерностей комплексного влияния технологических параметров магнитно-абразивной обработки на шероховатость поверхности и удельный съем материала; проведении экспериментальных исследований по обработке сложнопрофильных поверхностей методом магнитно-абразивной обработки; разработке цифровой модели процесса магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей; подготовке рекомендаций по назначению технологических параметров магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей с целью технологического обеспечения и повышения качества сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава АМц.

Публикации. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 13 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, в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка. Содержит 160 страниц машинописного текста, 70 рисунков, 21 таблицу, список литературы из 105 наименований и 5 приложений на 14 страницах.

Благодарности. Автор выражает благодарность декану механико-машиностроительного факультета Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, доктору технических наук, профессору Максарову Вячеславу Викторовичу за наставничество и помощь, оказанную при работе над диссертацией, а также коллективу кафедры машиностроения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе представлен аналитический обзор по вопросу эксплуатации изделий из алюминиевого сплава АМц, имеющих ответственные сложнопрофильные поверхности, выявлены основные дефекты и причины их преждевременного выхода из строя, а также рассмотрены современные методы обработки изделий из алюминиевых сплавов.

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 сложнопрофильных поверхностей и устройства для его осуществления, обеспечивающих равномерное распределение магнитной индукции в рабочем зазоре и равномерную шероховатость обработанной сложнопрофильной поверхности. Определены основные технологические параметры магнитно-абразивной обработки.

В третьей главе на основании разработанного технологического способа магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей и устройства для его осуществления проведены экспериментальные исследования по оценке влияния варьируемых параметров процесса (магнитной индукции, частоты вращения заготовки, времени обработки и амплитуды осцилляции) на шероховатость сложнопрофильной поверхности из алюминиевого сплава АМц и удельный съем материала.

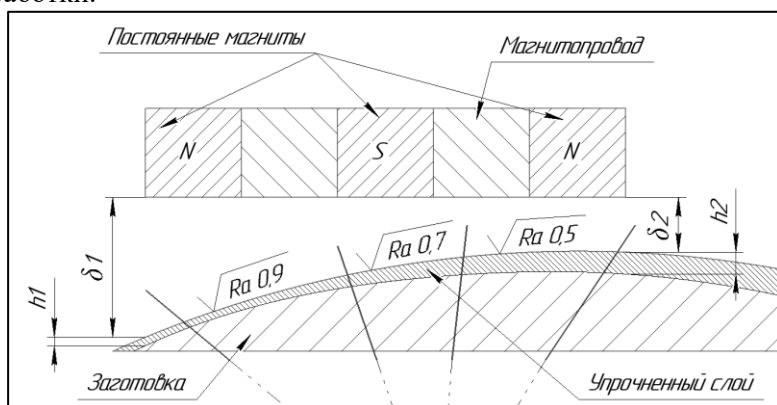
В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния применяемого способа окончательной обработки сложнопрофильной поверхности на твердость сложнопрофильной поверхности по всему обработанному профилю. Проведено сравнение производительности методов шлифования и магнитно-абразивной обработки.

В заключении отражены выводы и рекомендации по результатам исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что способ магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей, включающий в себя схему ориентации постоянных магнитов, сочетание рабочих движений, и устройство для его осуществления, обеспечивают равномерную магнитную индукцию $B \geq 0,6$ Тл в рабочем зазоре и, как следствие, равномерную шероховатость сложнопрофильной поверхности $Ra = 0,5$ мкм.

В результате теоретических и экспериментальных исследований по технологическому обеспечению качества сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава АМц установлено, что непостоянство рабочего зазора по всему обрабатываемому профилю влечет за собой неравномерное качество обработанной поверхности (шероховатость, твердость) (рисунок 1), снижение производительности обработки.



$h1, h2$ – глубина наклепа; $\delta1, \delta2$ – рабочий зазор

Разработан способ МАО сложнопрофильных поверхностей и устройство для его осуществления (патент на изобретение RU 2787597 С1), включающий в себя схему магнитно-абразивной обработки сложнопрофильной поверхности, конструкцию устройства с

постоянными магнитами, рабочие поверхности которых расположены эквидистантно касательным к обрабатываемой сложнопрофильной поверхности. Определены сочетания рабочих движений, диапазоны технологических параметров обработки, марка магнитно-абразивного порошка и СОЖ, разработана цифровая модель магнитно-абразивной обработки сложнопрофильной поверхности (рисунок 2).

Установлено, что магнитно-абразивную обработку сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава АМц следует проводить с применением магнитно-абразивного порошка Пр10Р6М5 (фракция $A=60...160$ мкм) и полусинтетической СОЖ *RANGLOIL-UNIVERSAL*.

Определены диапазоны технологических параметров магнитно-абразивной обработки: частота вращения заготовки $n = 115-750$ мин⁻¹; амплитуда осцилляции устройства $A = 0,25-1,5$ мм с периодом осцилляции $T = 2$ с.; время обработки в пределах $t = 4-12$ мин; величина магнитной индукции в диапазоне $B = 0,55-1,15$ Тл.

Разработанный способ и устройство реализованы на токарном станке *JET GHB 1340A DRO* (рисунок 3).

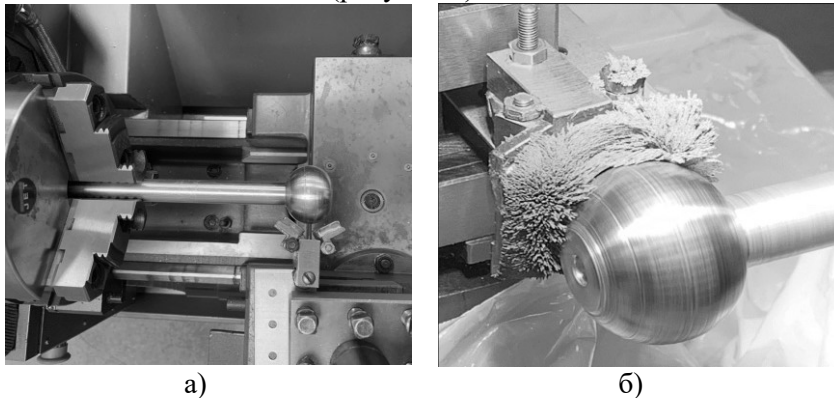


Рисунок 3 – Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильной поверхности, где: а) устройство в резцедержателе токарного станка *JET GHB 1340A DRO*; б) процесс обработки изделия

Предложенный способ позволяет обеспечить равномерную магнитную индукцию в рабочем зазоре $B=0,6$ Тл и, как следствие,

равномерную шероховатость сложнопрофильной поверхности $R_a = 0,5$ мкм.

2. Разработанные полиномиальные математические модели, учитывающие параметры магнитно-абразивной обработки – магнитную индукцию, частоту вращения, время обработки, амплитуду осцилляции, позволяют оценить эффективность варьирования технологических параметров, получить прогнозируемые значения шероховатости сложнопрофильной поверхности и удельного съема материала.

На основании разработанного способа магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей проведены экспериментальные исследования по влиянию варьируемых технологических параметров на формирование шероховатости сложнопрофильной поверхности R_a . Проведен анализ эффективности магнитно-абразивной обработки, которая оценивалась по удельному съему материала с обрабатываемой поверхности q .

В ходе исследования установлено, что применение разработанных способа магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей и устройства для его осуществления позволяет обеспечить равномерную шероховатость сложнопрофильной поверхности $R_a = 0,508$ мкм и удельный съем материала с единицы площади $q = 0,07144$ г/см².

На основании полученных моделей (рисунок 4), а также анализа результатов экспериментов установлено, что на шероховатость сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава АМц наибольшее влияние оказывает магнитная индукция B , затем частота вращения n , второстепенные позиции занимает величина амплитуды движения устройства A и время обработки t .

По результатам проведения экспериментальных исследований выполнена статистическая обработка полученных данных, которая позволила получить полиномиальные математические модели, учитывающие влияние технологических параметров магнитно-абразивной обработки на шероховатость сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава АМц.

Шероховатость поверхности R_a , мкм (1):

$$R_a = 3,710 - 5,734B + 0,035t - 0,002A + 2,8B^2 - 0,025t^2 + 0,067Bt - 0,029t. \quad (1)$$

Удельный съём материала q , г/см² (2):

$$q = 0,212 - 0,408B - 1,45t \cdot 10^{-2} + 0,188B^2 + 1,67Bt \cdot 10^{-2} - 0,029t + 1,859nt \cdot 10^{-4}. \quad (2)$$

Таким образом, полученные результаты являются основой для проведения окончательной обработки сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава АМц посредством предлагаемого способа и устройства для его реализации.

3. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что способ магнитно-абразивной обработки сложнопрофильной поверхности и устройство для его осуществления позволяют повысить производительность обработки по сравнению со шлифованием в 1,4 раза в диапазоне частоты вращения заготовки $n = 115 - 750 \text{ мин}^{-1}$, а также повысить твердость сложнопрофильной поверхности по всему обработанному профилю в 1,2 раза.

В результате проведенных исследований были получены значения производительности обработки p методом шлифования сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава марки АМц для 5 серий экспериментов с различной частотой вращения заготовки n от 115 до 750 мин^{-1} . Обработка производилась до достижения шероховатости сложнопрофильной поверхности $R_a = 0,6-0,8 \text{ мкм}$. Применение способа магнитно-абразивной обработки по сравнению со шлифованием позволяет увеличить производительность обработки в 1,4 раза (рисунок 5).

По итогам проведенных экспериментальных исследований влияния способа окончательной обработки на твердость сложнопрофильной поверхности (рисунок 6) установлено, что применение магнитно-абразивной обработки сложнопрофильной поверхности при технологических параметрах: $B = 0,85..1,0 \text{ Тл}$; $n = 190..750 \text{ мин}^{-1}$; $t = 8..10 \text{ мин}$; $A = 0,75..1,5 \text{ мм}$, позволяет обеспечить повышение твердости поверхности HB по всему профилю в 1,2 раза.

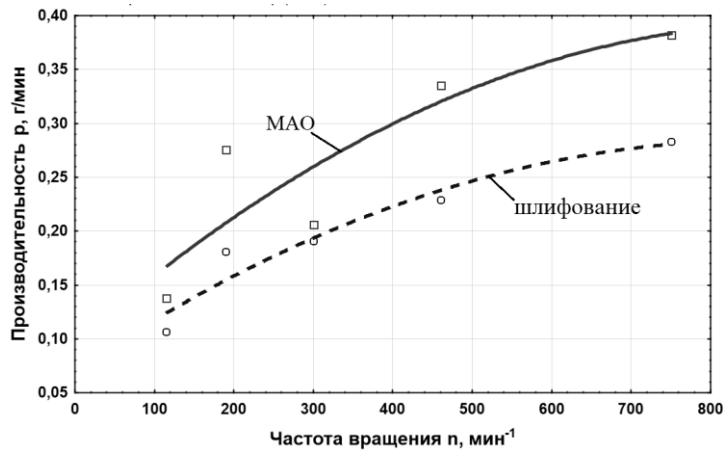


Рисунок 5 – Производительность p процесса окончательной обработки в зависимости от частоты вращения n заготовки

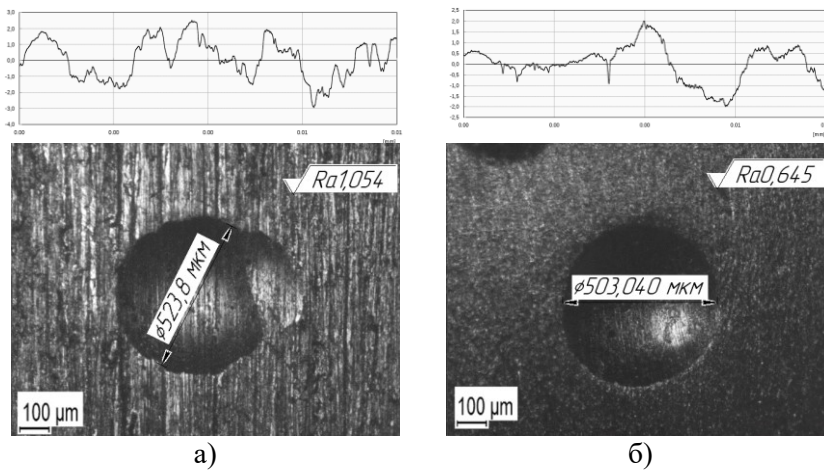


Рисунок 6 – Снимок сложнопровфильной поверхности из алюминиевого сплава АМц с отпечатком твердомера НТ-1208, где: а) до магнитно-абразивной обработки; б) после магнитно-абразивной обработки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований сделаны следующие выводы:

1. На основании проведенного анализа особенностей окончательной обработки изделий из алюминиевых сплавов, текущего состояния и перспектив развития технологического обеспечения и повышения качества сложнопрофильных поверхностей посредством магнитно-абразивной обработки выявлены основные особенности магнитно-абразивной обработки, определены основные технологические параметры процесса (магнитная индукция B , время обработки t , движение подачи или осцилляции, частота вращения заготовки n , величина рабочего зазора, масса порошка, СОЖ). Установлено, что на работоспособность элегазового трансформатора существенное влияние оказывает качество сложнопрофильных поверхностей его корпусных деталей, экранов, так как при эксплуатации ответственных изделий, работающих в условиях воздействия газовых, гидравлических потоков, высоких температур и разрушающей среды агрессивных химических сред, происходит их преждевременное разрушение.

2. Разработан способ МАО сложнопрофильных поверхностей и устройство для его осуществления (патент на изобретение RU 2787597 С1), включающий в себя схему магнитно-абразивной обработки сложнопрофильной поверхности, конструкцию устройства с постоянными магнитами, рабочие поверхности которых расположены эквидистантно касательным к обрабатываемой сложнопрофильной поверхности. Предложенный способ и устройство для его осуществления обеспечивают равномерное распределение магнитного поля в рабочем зазоре.

3. Экспериментально определены диапазоны варьируемых технологических параметров обработки, а также значения статических параметров. В качестве магнитно-абразивного порошка выбран порошок марки Пр10Р6М5, масса m порошка, заполняемого рабочий зазор, составляет 90 г, фракция $\Delta=60-160$ мкм. Принят диапазон магнитной индукции B для экспериментальных исследований от 0,55 Тл до 1,15 Тл, что соответствует значениям магнитной индукции у поверхности неодимовых магнитов классов от $N33$ до $N54$ соответ-

ственно. Принят диапазон частоты вращения заготовки в соответствии с режимами работы токарного станка *JET GHB 1340A DRO* $n = 115-750$ мин⁻¹, диапазон значений амплитуды осцилляции устройства $A = 0,25-1,5$ мм с постоянным периодом осцилляции $T = 2$ с. Экспериментально определены закономерности влияния технологических параметров МАО на шероховатость обработанной поверхности и удельный съем материала, а также установлено, что в процессе МАО сложнопрофильной поверхности по предлагаемому способу, значение удельного съема материала с единицы площади достигает $q = 0,07144$ г/см², что позволяет обеспечить шероховатость сложнопрофильной поверхности $R_a = 0,508$ мкм, что в 2-2,5 раза ниже по сравнению с исходной.

4. Разработаны математические модели зависимости шероховатости обработанной сложнопрофильной поверхности и удельного съема материала от технологических параметров магнитно-абразивной обработки. Комбинации технологических параметров магнитно-абразивной обработки влияют на качество обработанной сложнопрофильной поверхности, производительность и эффективность обработки. При наборе любых технологических параметров наблюдается положительная тенденция в изменении шероховатости поверхности по параметру R_a и съему материала q . Применение разработанного способа и устройства для его осуществления позволяет достичь шероховатости обработанной поверхности по $R_a=0,5$ мкм.

5. Экспериментально определено, что применение метода МАО сложнопрофильных поверхностей позволяет увеличить производительность в диапазоне частоты вращения заготовки $n = 115 - 750$ мин⁻¹ по сравнению со шлифованием в 1,4 раза, а также повысить твердость сложнопрофильной поверхности по всему обработанному профилю в 1,2 раза.

6. Разработаны практические рекомендации применения способа МАО сложнопрофильных поверхностей с диапазонами технологических параметров $B=0,7-1,15$ Тл; время обработки $t=4-8$ мин; частота вращения заготовки $n=460-750$ мин⁻¹; амплитуда осцилляции $A=1-1,5$ мм с периодом $T = 2$ с.

7. 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 ООО «ИСО».

8. Перспективы дальнейшего развития исследований в области технологического обеспечения качества сложнопрофильных поверхностей методом магнитно-абразивной обработки заключаются в исследовании методов моделирования процесса обработки с учетом физических характеристик частиц порошка, предварительного моделирования процесса для подбора технологических параметров, конструктивных особенностей устройства, распределения магнитной индукции, а также в разработке универсальных способов и устройств для обработки поверхностей различных конфигураций.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Максаров, В.В. Технологическое обеспечение качества поверхностей изделий из коррозионностойких алюминиевых сплавов при токарной обработке / В. В. Максаров, А. Д. Халимоненко, Т. С. Голиков, **Д. Д. Максимов** // Металлообработка. – 2020. – № 5-6(119-120). – С. 3-12.

2. Бригаднов, И. А. Технологическое обеспечение качества обработки коррозионностойких алюминиевых сплавов для изделий сферической формы / И. А. Бригаднов, Т. С. Голиков, **Д. Д. Максимов** // Металлообработка. – 2021. – № 1(121). – С. 33-43.

3. **Максимов, Д. Д.** Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей изделий из алюминиевых сплавов / **Д. Д. Максимов**, И. А. Бригаднов, В. Е. Трушников // Металлообработка. – 2022. – № 2(128). – С. 32-39.

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

4. Krasnyu, V. A. Improving the wear resistance of piston rings of internal combustion engines when using ion-plasma coatings / V. A. Krasnyu, V. V. Maksarov, **D. D. Maksimov** // Key Engineering Materials.

– 2020. – Vol. 854 KEM. – P. 133-139. – DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.854.133.

5. Panteleenko, F. Fast Magnetic Abrasive Finishing with Diffusionally Alloyed Powder / F. Panteleenko, G. Petrishin, V. Maksarov, **D. Maksimov** / Russian Engineering Research. – 2023. – Vol. 43. – No. 4 – P. 470-473.

6. Maksarov, V.V. QUALITY CONTROL OF COMPLEX CONTOUR SURFACES IN ALUMINUM ALLOY ITEMS DURING MAGNETIC ABRASIVE FINISHING / V.V. Maksarov, **D.D. Maksimov**, M.S. Sinyukov // Tsvetnye Metally, No. 4. 2023. pp. 96-102.

Публикации в прочих изданиях:

7. Максаров, В. В. Магнитно-абразивная обработка изделий сложной геометрической формы / В. В. Максаров, **Д. Д. Максимов** // Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса: Сборник научных трудов IV Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 04–05 марта 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 326-330.

8. **Максимов, Д. Д.** Обеспечение качества поверхностей сложного профиля изделий из алюминиевого сплава АМц / **Д. Д. Максимов** // Актуальные проблемы недропользования: Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов, Санкт-Петербург, 12–16 апреля 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 134-136.

9. **Максимов, Д. Д.** Формирование качества поверхностей сложного профиля изделий из алюминиевого сплава амц с применением магнитно-абразивной обработки / **Д. Д. Максимов** // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021: VIII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ. СБОРНИК ТЕЗИСОВ. СЕКЦИЯ «КРУГЛЫЙ СТОЛ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ», Санкт-Петербург, 22–23 апреля 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 85-87.

10. **Maksimov, D. D.** Quality assurance of surfaces of complex profile of products from Alluminum alloy / **D. D. Maksimov** // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: XVII International Forum-

Contest of Students and Young Researchers. Scientific conference abstracts, St Petersburg, 31 – 06 мая 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – Р. 121-122.

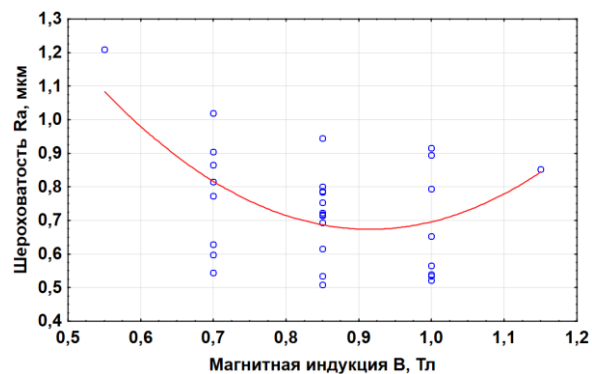
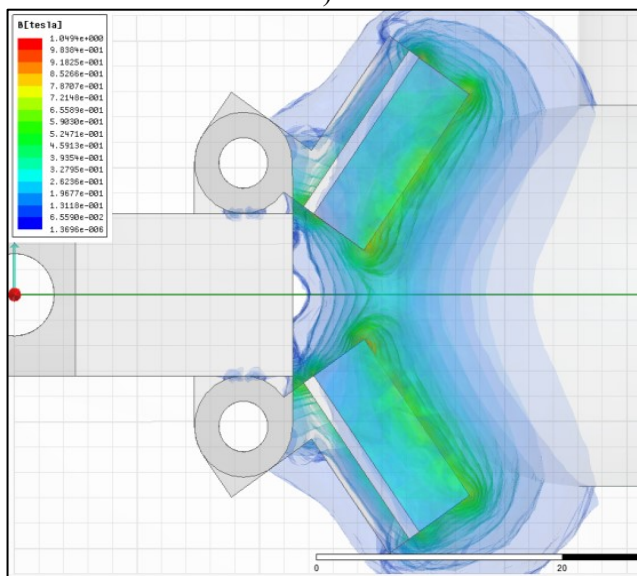
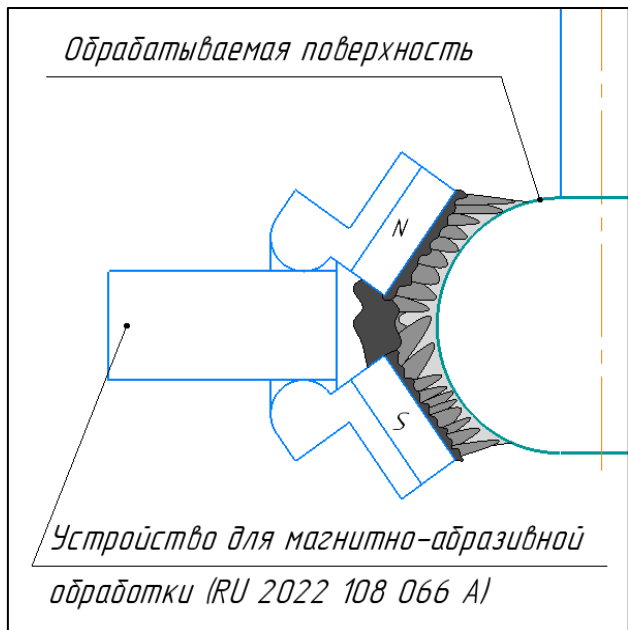
11. **Максимов, Д. Д.** Обеспечение качества изделий сложного профиля методом магнитно-абразивной обработки / **Д. Д. Максимов, В. В. Максаров** // Высокие технологии в машиностроении : Материалы XVIII всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Самара, 24–25 ноября 2021 года / Отв. редактор Р.Г. Гришин. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2021. – С. 85-87.

12. **Максимов, Д. Д.** Особенности формирования магнитного поля при магнитно-абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей / **Д. Д. Максимов** // Механика и машиностроение. Наука и практика: Материалы международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 09 декабря 2022 года. Том 5. – Санкт-Петербург: Индивидуальный предприниматель Жукова Елена Валерьевна, 2022. – С. 66-67.

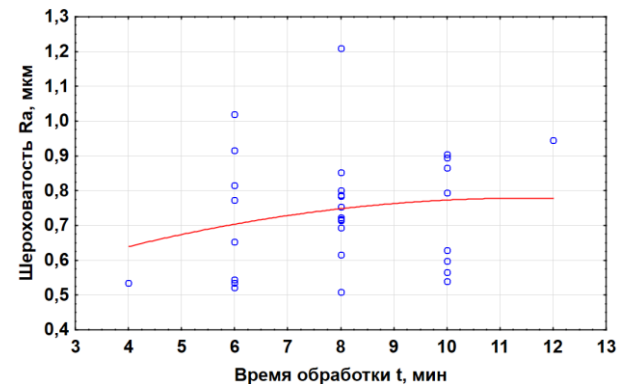
13. **Максимов, Д. Д.** Особенности магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных изделий / **Д. Д. Максимов** // Россия молодая: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ XIV ВСЕРОССИЙСКОЙ, НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ, Кемерово, 18–21 апреля 2023 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2023.

Патент:

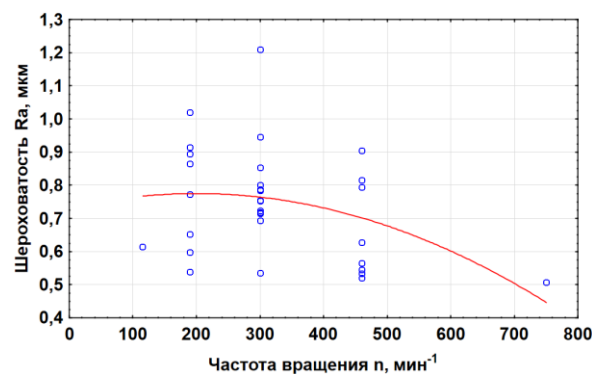
14. Патент № 2787597 С1 Российская Федерация, МПК В24В 31/112. Способ магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей и устройство для его осуществления: № 2022108066: заявл. 28.03.2022; опубл. 11.01.2023 / В. В. Максаров, А. И. Кексин, **Д. Д. Максимов**, В. Г. Куфаев; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет".



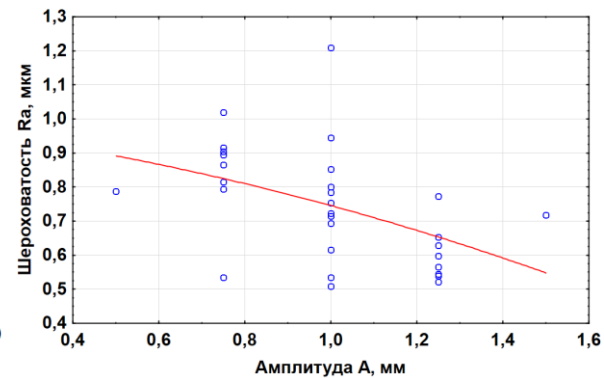
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4 – Графики влияния а) магнитной индукции B , б) времени обработки t , в) частоты вращения n , г) амплитуды осцилляции A на шероховатость R_a , мкм при обработке сложнопрофильной поверхности

Рисунок 2 – Устройство для магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей, где:
а – общий вид; б – цифровая модель распределения магнитной индукции в рабочем зазоре